INFORME ESPECIAL: INTERNET EN CASA • HEPATITIS C • EL REINO DE NEFERTARI

INVESTIGACION y CIENCIA

DICIEMBRE 1999
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

¿Vida en Europa?



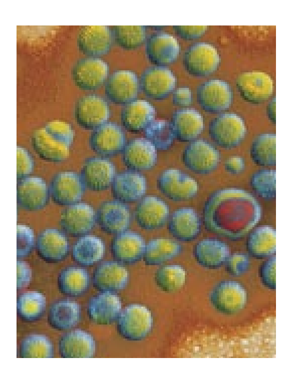
00279
9 770210 136004



Diciembre de 1999 Número 279

SECCIONES











Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: Don Dixon

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-9	G. Aldana
10	Neville Agnew
11	G. Aldana
14-15	NASA/Laboratorio de Propulsión a Chorro; Cynthia Phillips y Moses Milazzo (*arriba*); NASA (*izquierda y centro*); Tom Moore (*derecha*)
16-17	NASA/Laboratorio de Propulsión a Chorro; Alfred T. Kamajian (*abajo, izquierda*)
18-19	NASA/Laboratorio de Propulsión a Chorro; Cynthia Phillips (*abajo, izquierda*); NASA/Laboratorio de Propulsión a Chorro (*arriba, izquierda*); Sarah Donelson, fuente: Thomas B. McCord (*arriba, derecha*)
20	Max Coon (*izquierda*); NASA/ Laboratorio de Propulsión a Chorro, Roland Wagner (*derecha*)
21	NASA/Lab. de Propulsión a Chorro, Paul Geissler y Moses Milazzo (*arriba*); Tom Moore (*abajo*)
22	Tom Moore, fuente: Frank D. Carsey y Martin J. Siegert
23	NASA/Lab. de Propulsión a Chorro; Cynthia Phillips (*izquierda*); Nicole Spaun (*derecha*)
24-25	Matthew Holmes
26	Slim Films (*izquierda*); Kudo (*derecha*)
27	Chris Jones (*izquierda*); Slim Films (*derecha*)
28	David Fierstein
29	Slim Films
30-31	AP/Wide World Photo
40	Tony Stone Images, manipulación fotográfica Jana Brenning
41	Yohko K. Shimizu
42-43	Laurie Grace (*arriba*); Elizabeth M. Brunt (*abajo*)
44-45	Keith Kasnot, fuente: Charles M. Rice
47-48	AURA/STScI
49	Observatorio Español del Roque de los Muchachos (IAC)
51	Cortesía de M. Balcells
52	Observatorio Español del Roque de los Muchachos (IAC)
54-55	Casiana Muñoz Tuñón y Guillermo Tenorio Tagle
58-59	Slim Films
62	Sarah Donelson, fuente: Xiaowei Yang M.I.T.
64-73	Ian Worpole
74-75	Slim Films
76-78	Sarah Donelson
80-81	George Musser; *Daniels & Daniels*; fuente: Molecular Dinamics
82-83	Bryan Christie
84	Dusan Petricic
91	Bryan Christie

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

José Manuel García de la Mora: *La conservación del legado de Nefertari*; Mónica Murphy: *El océano oculto de Europa*; Néstor Herrán: *Por qué se rompen los objetos*; Esteban Santiago: *Hepatitis C*; Luis Bou: *En carrera: datos de alta velocidad para los hogares* y *Juegos matemáticos*; Angel Garcimartín: *Internet por cable, DSL: banda ancha por teléfono, La más ancha de las bandas anchas* y *Perfiles*; J. Vilardell: *Satélites: el campo de batalla estratégico, Servicio de distribución multipunto local, Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

Ciencia y sociedad: Juan Carlos Rodríguez Rubio: *Venido del fondo marino*; Juan Pedro Campos: *¿Qué es una onda?*; Luis Bou: *Ver la luz*; Néstor Herrán: *Cambios en el CERN*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Senior Associate Editor*; Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; W. Wayt Gibbs, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler, *On-Line Editor*; Mark Alpert, Carol Ezzell, Alden M. Hayashi, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette, *Editors;* Graham P. Collins; Marguerite Holloway, Steve Mirsky y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION William Sherman
CHAIRMAN Rolf Grisebach
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Joachim P. Rosler

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.150 pta.	20.700 pta.
	67,01 euro	124,41 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

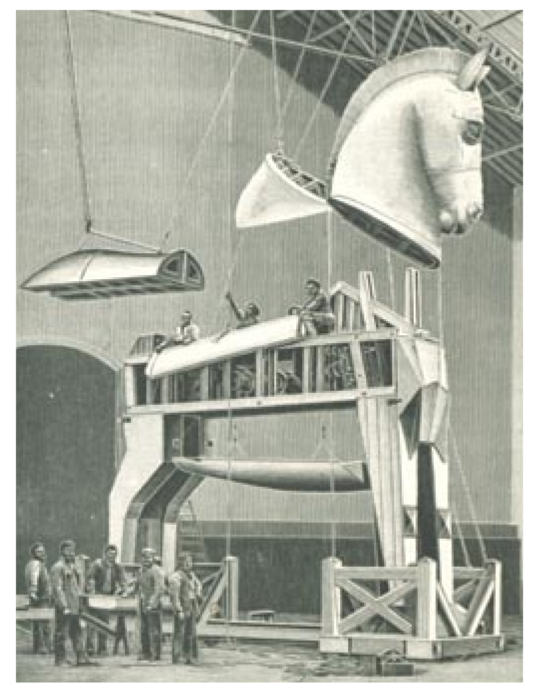
HACE...

...cincuenta años

SUPERNOVAS. «Está claro que las explosiones de supernovas no son de naturaleza química, pues a las enormes temperaturas de la materia estelar todos los compuestos químicos están disociados. Sabemos que las estrellas se abastecen de energía mediante algún sistema de reacciones termonucleares, siendo de ellas la más plausible la del llamado ciclo del carbono, que transforma el hidrógeno en helio. Supóngase que en cierta etapa de la evolución de una estrella, una reacción endoenergética hiciese que la presión en su centro bajara bruscamente. El cuerpo de la estrella se hundiría, casi como la techumbre de un edificio en llamas. —George Gamow»

NUEVOS TRATAMIENTOS HORMONALES. «En unos términos insólitos para un clínico, Walter Bauer, de la Facultad de Medicina de Harvard, hablando en una reunión sobre los fármacos hormonales, saludó el descubrimiento de los efectos terapéuticos de la hormona adrenocorticotrópica, o HACT, como 'el comienzo de una nueva era en medicina'. La HACT y la cortisona han resultado espectacularmente eficaces para tratar la artritis y la miastenia gravis. Otros de los presentes informaron de buenos resultados de la HACT con el asma, la gota y el eccema. Pero investigadores de la Facultad de Medicina y Cirugía de la Universidad de Columbia han afirmado que puede causar dolores de cabeza y elevar la presión arterial. Además, posee unos efectos psicológicos peculiares, como confusión mental y violencia.»

¿TRADUCTORA UNIVERSAL? «Si pueden construirse máquinas para calcular, jugar al ajedrez, incluso 'pensar', ¿por qué no una máquina para traducir de un idioma a otro? Expertos británicos están diseñando una traductora basada en el almacenamiento o aparato de 'memoria' de una máquina matemática. 'Leído' con un aparato de barrido fotoeléctrico el texto a traducir, la máquina buscaría las palabras en el diccionario integrado en la unidad de memoria del instrumento y pasaría las traducciones a máquinas de escribir eléctricas.»



Arte y artificio: el caballo de Troya en la Opera de París

...cien años

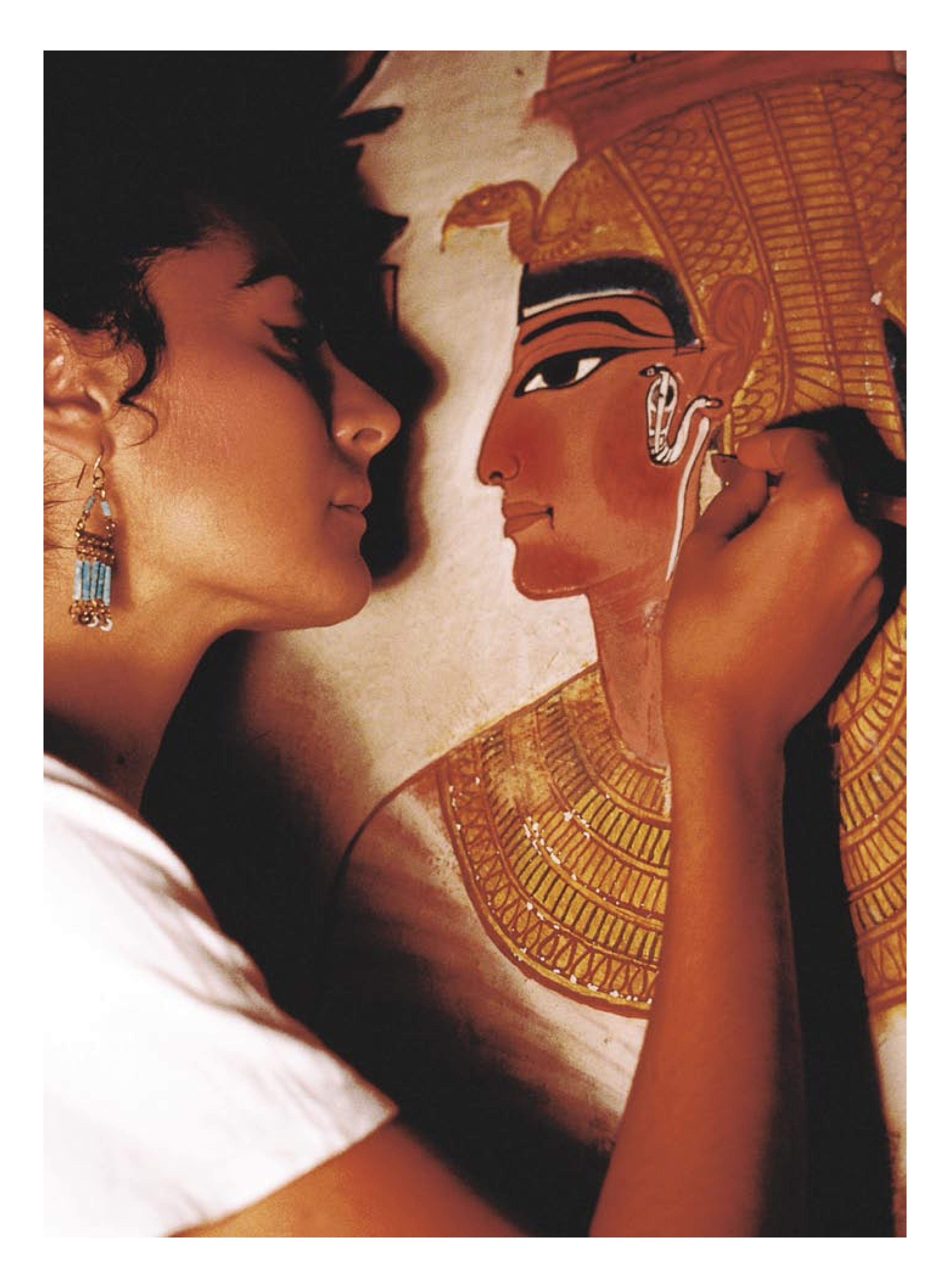
CUESTIONES DE FÍSICA FUNDAMENTALES. «¿Qué es la materia? ¿Qué es la gravitación? Newton y grandes astrónomos posteriores han probado que, dentro de las distancias planetarias, la materia atrae con una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Pero, ¿dónde está la prueba de que esa ley sea válida para distancias más cortas? Entonces, ¿qué podemos decir acerca de la relación entre la gravitación y el tiempo? ¿Podemos suponer por un instante que permanece inalterada la gravitación de dos cuerpos que se muevan por el espacio a grandes velocidades? Creo que no. Tampoco podemos aceptar la demostración de Laplace de que las fuerzas gravitatorias se propaguen instantáneamente a través del espacio, pues resulta fácil imaginar hechos importantes compensatorios imprevistos por Laplace.»

EL ÚLTIMO BÚFALO. «Uno de los hechos más extraordinarios que han caracterizado a esta segunda mitad de siglo es el exterminio, la aniquilación, del bisonte americano. Es el 'crimen del siglo'. En las manadas del sur, entre 1872 y 1874 los blancos mataron 3.158.780 cabezas, cuyas pieles llegaron al este por las rutas de Atchinson, Topeka y Santa Fe. Durante ese mismo tiempo los indios mataron 390.000, y los colonos y los indios de las montañas otros 150.000. Pero la culpa última es del gobierno, que durante todos esos años permitió a unos pocos congresistas ignorantes bloquear las leyes para la protección del bisonte.»

EL CABALLO DE TROYA. «La Opera de París ha puesto en escena 'La toma de Troya', de Berlioz. Si consultamos *La Ilíada* y *La Eneida*, podría admitirse perfectamente que el caballo presente se asemeja a la máquina de guerra que construyeron los griegos, pero como la Opera no ofrece la misma representación cada día, fue necesario que el caballo pudiera desmontarse fácilmente. En el caballo no hay espacio para esconderse, pues la pieza no requiere la salida de los guerreros griegos ante el público.»

...ciento cincuenta años

EL SUEÑO DE CALIFORNIA. «Según las últimas noticias de California, se ha adoptado allí una constitución y han solicitado el ingreso en la Unión. Hay un gran número de chinos en California trabajando de carpinteros y son unos *ciudadanos* muy industriosos y apacibles. El oro abunda todavía y las perspectivas son buenas, trabajando duro y, por desgracia, con posibilidad de enfermar. Los abastecimientos son cuantiosos y no hay exaltamientos políticos. Se ha concedido un divorcio.»



La conservación del legado de Nefertari

La tumba de esta reina del antiguo Egipto testimonia el gran amor del faraón Ramsés II. Su recuperación refleja los progresos en las técnicas de conservación de los monumentos del pasado

Neville Agnew y Shin Maekawa

Sabemos muy poco de la vida de Nefertari, esposa favorita del faraón Ramsés II, que reinó en Egipto de 1290 a 1224 a.C. aproximadamente. De lo que no cabe duda es del amor que le profesó su marido. Este se aseguró de que la estatua dedicada conjuntamente a Nefertari y a la diosa Hator, en Abu Simbel, fuese del mismo tamaño que la suya propia, honor que a ninguna otra reina egipcia le fue tributado.

Los epítetos que aplica el faraón a Nefertari constituyen señales inequívocas de su pasión: "dama de ensueño", "dulzura del amor", "bellísima de cara", "por quien el sol resplandece". Al morírsele Nefertari, Ramsés II le rendiría aún un último y espectacular tributo de adoración. Pese a no ser de sangre real, hizo que la sepultaran en el Valle de las Reinas, en una tumba decorada.



Los murales de la cámara mortuoria se cuentan entre las pinturas más bellas del arte funerario faraónico. Como sucede en otras tumbas, a Nefertari sólo se la ha representado en su viaje al más allá y en sus encuentros con Isis y Osiris, entre otras deidades. Ninguna pintura versa sobre su vida cotidiana con Ramsés II o con sus seis o siete hijos. Pero hasta en el describir un viaje ritual —ateniéndose al estricto formulismo establecido en el capítulo 174 y en otros pasajes del *Libro de los Muertos*— las pinturas de la tumba son únicas por su vívido colorido y su riqueza de detalles.

1. PASADO Y PRESENTE se miran cara a cara. Lorenza D'Alessandro limpia una pintura que representa a la reina Nefertari (*página contigua*), imagen cuyos deterioros deberán ser subsanados del mejor modo posible. Como lo hace ya presentir su polícroma entrada, la tumba de Nefertari en el Valle de las Reinas encierra algunas de las más espectaculares pinturas de su tiempo (*arriba*).

Puede que la devoción de Ramsés II a su reina haya protegido a ésta en su viaje por el más allá, pero de lo que no podía protegerla es del inexorable paso del tiempo. Cuando, en 1904, el arqueólogo italiano Ernesto Schiaparelli descubrió la tumba, ésta había sido ya profanada y saqueada. Los tesoros que se pretendió que acompañasen a Nefertari en el otro mundo habían sido robados, su sarcófago estaba roto y su momia había desaparecido.

Las pinturas murales de la tumba estaban también muy deterioradas, pero ello no se debía a saqueadores sino a procesos naturales. La roca caliza en que se labró la cavidad fue soltando a lo largo de los siglos mucha sal, que, al cristalizar bajo la capa de enlucido que servía de soporte a las pinturas, había destruido gran parte de éstas. En los decenios posteriores al descubrimiento, los visitantes de la espectacular tumba fueron acelerando el deterioro de la decoración. Lo más probable es que los mayores daños los causara el continuo toqueteo de las frágiles superficies, pero la humedad producida por la respiración y los sudores de tantas personas debió de contribuir también al estropicio. Los arqueólogos y los historiadores del arte se interesaron cada vez más por la tumba, y, en los años veinte, el Museo Metropolitano de Nueva York financió una minuciosa documentación fotográfica de los murales. (Con este registro se complementó la serie de 132 placas en negativo que el fotógrafo de Schiaparelli había ido confeccionando en 1904 y 1905, así como otros registros fotográficos efectuados en años sucesivos.) Pero las pinturas seguían en peligro; la cosa se hizo, por fin, tan evidente que, en las postrimerías de los años treinta, el gobierno egipcio decidió cerrar al público la tumba.

A partir de entonces, el amable legado de Nefertari permaneció sumido en la oscuridad y en el silencio, vi-







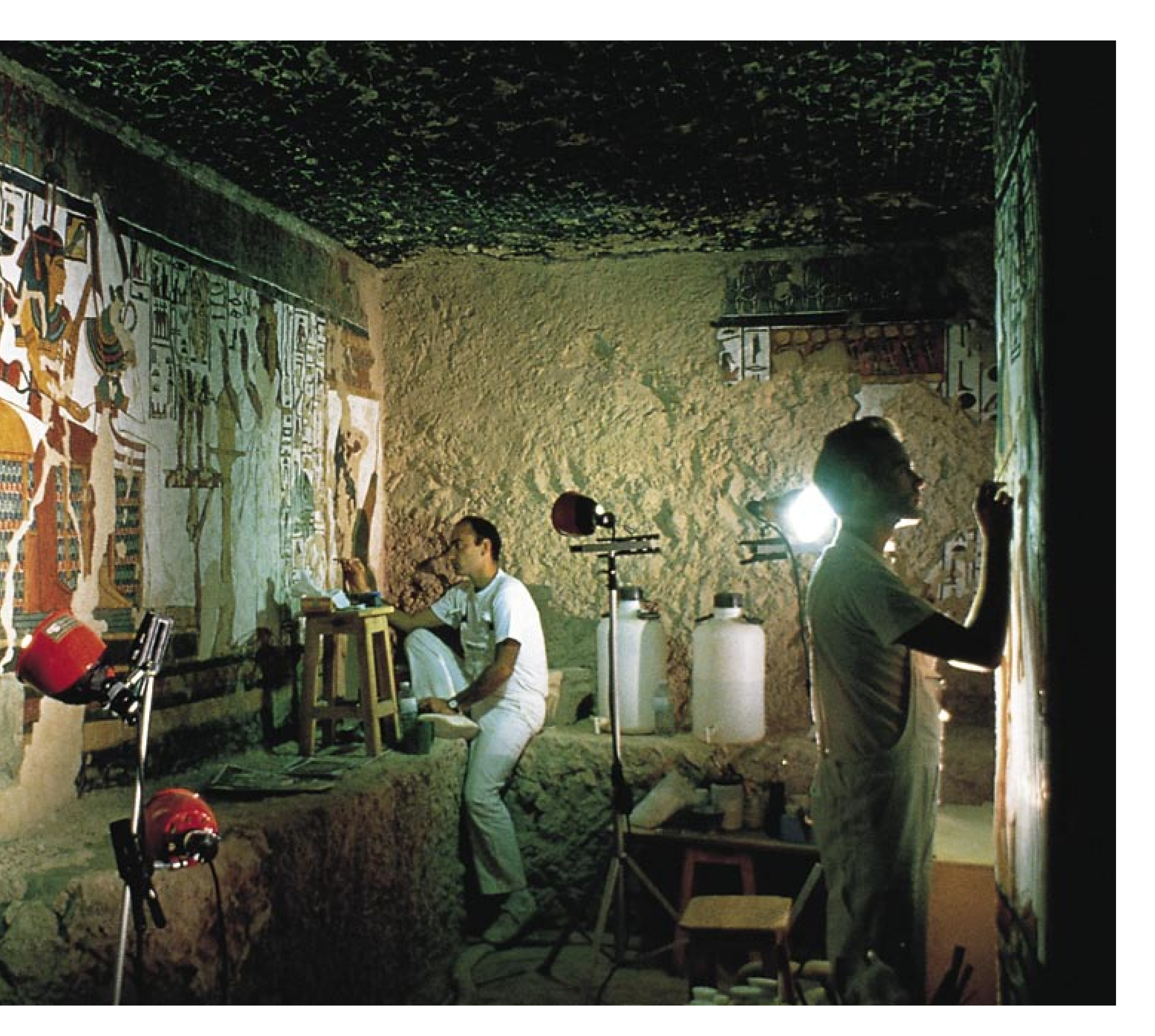
2. LOS CRISTALES DE SAL, formados al infiltrarse el agua por la roca caliza donde se excavó la cámara, fueron empujando del fondo rocoso el enlucido de yeso y destruyeron muchas pinturas antes de que los conservadores iniciaran sus trabajos (*foto superior de las de encima*). En anteriores intentos de restauración tan sólo se había procurado, infructuosamente, frenar el deterioro sujetando en su sitio el soporte con gasas engomadas (*arriba, foto inferior*). En cambio, los trabajos más recientes se plantearon y ejecutaron con mejor acuerdo: los conservadores quitaron los cristales de sal, fijaron de nuevo el soporte a las paredes y limpiaron las pinturas (*derecha*).

sitado tan sólo por algunos especialistas. Pero, a finales de los setenta, la UNESCO, el Centro Internacional de Estudios sobre Conservación y Restauración del Patrimonio Cultural, la Universidad de El Cairo y otras entidades emprendieron una serie de estudios sobre la situación real de varias tumbas importantes. La investigación sacó de nuevo a la luz el deplorable estado en que se hallaban las pinturas de la tumba de Nefertari. Más recientemente, los responsables del Instituto Getty para la Conservación y los de la Organización Arqueológica de Egipto instaron la salvación de las pinturas que aún quedan, con la posible reapertura de la tumba al público.

Entre 1986 y 1992 ambas instituciones trabajaron en la conservación de las pinturas con los más adelantados instrumentos y técnicas. En la tarea aportaron sus conocimientos historiadores del arte, expertos en conservación, físicos del aire, topógrafos, químicos, microbiólogos y técnicos especializados. Porque no se trataba sólo de proteger las pinturas murales —lo que ya era bastante complicado— sino que, además, había que estudiar a fondo el microclima y las condiciones hidrológicas de la tumba entera para disponerla de tal suerte que, después de tantos trabajos, no empezara otra vez a deteriorarse.

Hoy, a los siete años del término de semejante labor, parece ser que las pinturas se mantienen estables y que es duradero el buen éxito logrado. Las pinturas pueden contemplarse de nuevo; el público puede admirar la serena belleza de la reina Nefertari, sabiendo que lo que admira son las obras originales y no meras reproducciones hechas por manos del siglo XX. El equipo que trabajó en la difícil empresa de su conservación estuvo desde el principio de acuerdo en no realizar restauración alguna, esto es, en no añadir ni una pincelada donde faltase la pintura original, aunque los registros fotográficos habrían posibilitado tal restauración.

A veces, la restauración de obras de arte se lleva a cabo, con reticencias o sin ellas, para recrear la



armonía visual y la coherencia originarias de la pieza. Pero, procediendo así, se compromete inevitablemente la integridad del objeto artístico. En el caso de la tumba de Nefertari, todos los implicados decidieron que lo mejor era dejar que en las pinturas se patentizase el transcurso del tiempo y que lo antiguo no debía hibridarse con lo moderno.

Comprobación del deterioro

Lo primero que hizo el equipo de conservadores fue evaluar el estado general de las pinturas. Estudiaron milímetro a milímetro el material de enlucido para ver dónde no lo había ya, si el que quedaba era o no consistente y si seguía estando adherido a la roca de la pared o si se había separado y resquebrajado; distinguieron también los sitios en que la roca estaba a punto de asomar a través de esa capa alisadora. A continuación, examinaron la pintura para ver si se desconchaba, si había peligro de que se desprendiese, si perdía densidad y cohesión, y si estaba sucia de polvo, microorganismos o nidos de insectos. Al mismo tiempo, el equipo fue registrando los grados de cristalización de la sal sobre la superficie de las pinturas y entre el enlucido de soporte de la pintura y la roca de las paredes. Finalmente, acotaron las intervenciones anteriores: las partes en que se había retocado la pintura o se había querido suplir su falta cubriendo, por ejemplo, los desconchados con gasas o cinta adhesiva.

Concluido el minucioso examen del estado general, Paolo Mora, que había sido en Roma conservador jefe del Instituto Central de Restauración, y su esposa, Laura Mora, dieron comienzo al arduo trabajo de conservar las pinturas. Los Mora y sus colegas empezaron extrayendo de las pinturas y del soporte minúsculas muestras de sus pigmentos. Dado el extraordinario refinamiento de aparatos y técnicas empleados —difracción por rayos X, fluorescencia por rayos X, microscopios de luz polari-

NEVILLE AGNEW y SHIN MAEKAWA trabajan juntos en el Instituto Getty para la Conservación, cuya sede está en Los Angeles. Agnew, doctor en química, dirige el despacho de información y comunicación. Maekawa, especialista en microambientes, ideó y vigiló la instalación del sistema anóxico de conservación de momias en el Museo de El Cairo.

zada, cromatografía de gases y líquidos, etcétera—, los investigadores sólo necesitaban muestras mínimas de los materiales para descubrir su composición química. Una vez conocidos los ingredientes, no sería ya difícil idear la mejor manera de salvar o estabilizar las pinturas. Entre tanto, evitaron su ulterior degradación aplicando al enlucido tiras de papel de corteza de morera japonesa, que impedían que esa capa de soporte se siguiera desprendiendo de las paredes y podrían quitarse fácilmente al llevar a cabo el trabajo definitivo.

Los investigadores descubrieron que los pigmentos eran, como cabía esperar, típicos de la época de Nefertari: verde egipcio, azul egipcio (o cuproazurita), rojo obtenido mezclando óxido de hierro con algo de manganeso y arsénico, ocre para el amarillo, calcita, anhidrita y caolinita para el blanco, y carbón vegetal para el negro. Como mordiente que mantuviera adheridos los pigmentos se usaba casi siempre goma arábiga, una resina producida por una acacia local. Algunas de las pinturas aparecían barnizadas con resina natural y clara de huevo, aunque los análisis de laboratorio denunciaron también la presencia de dos modernas resinas sintéticas, lo que indicaba que algo antes se había hecho un indocumentado esfuerzo restaurador. El enlucido se había compuesto mezclando yeso, anhidrita y légamo del Nilo con algo de piedra caliza triturada; para reforzarlo y evitar que, al secarse, se resquebrajara se había introducido paja de trigo.

Sabiendo lo que se tenía ante sí, empezaron los trabajos de conservación. Durante 469 días —repartidos en más de cinco años— los expertos limpiaron las pinturas, quitaron los cristales de sal de las superficies de la roca y de algunos puntos de debajo del soporte. Después, lo pegaron de nuevo a la piedra empleando para ello un adhesivo acrílico mezclado con arena local y polvo de yeso. A continuación, volvieron a fijar al fondo los fragmentos que estaban a punto de desprenderse, y en los sitios en que el mordiente fijador de los pigmentos se había degradado añadieron un copolímero acrílico para evitar que se estropeara del todo. Taparon los rotos y las grietas con argamasa y eliminaron los anteriores arreglos chapuceros.

Era importantísimo que estos esfuerzos no menoscabaran los colores originales. Así que, antes de que empezasen los trabajos de conservación, Michael Schilling, del Instituto Getty para la Conservación, hizo 1500 mediciones del color en 160 puntos de diversas partes de la tumba. Se sirvió de un cromómetro (un Minolta CR-121) para cerciorarse de los valores exactos de cada colorido. Tales registros no sólo ayudaron a dar el debido cumplimiento al proceso, demostrando que no se habían alterado los colores originales, sino que facilitan también el control de las pinturas.

Mantener a raya la sal

Las preocupaciones por el futuro de estas pinturas giran en torno a la amenaza más palmaria: la sal. Desde un comienzo, se descubrieron por debajo del enlucido unas estructuras de sal de hasta 15 milímetros de espesor, que promovían el desprendimiento de la capa de soporte. Esta sal proviene de la roca caliza de Tebas, el sedimento marino en el que excavaron la tumba sus constructores. La sal no es ningún peligro para la mayoría de las tumbas, porque la extrema sequedad del clima egipcio sirve de poderoso preservativo que mantiene íntegros e incorruptos las momias y sus objetos acompañantes. Pero en la cámara funeraria de Nefertari hubo alguna fuente de agua que disolvió la sal y la movilizó.

No todos los que han trabajado allí están de acuerdo —tras años de estudios— sobre cuál fuese exactamente

3. EL CONTROL DEL AMBIENTE es decisivo para el futuro de las pinturas. Shin Maekawa (*izquierda*) estudió el microclima de la tumba empleando para ello un sistema alimentado por energía solar; determinó que había que regular el número de visitantes para que la temperatura y la humedad no intensificaran otra vez la formación de cristales de sal en el interior de la tumba. Ahora sólo se permite que entren 150 turistas por día.



4. LAS PINTURAS MURALES DE ESTA TUMBA han sido, por fin, objeto de una excelente labor conservadora, gracias a la cual muchas de las imágenes del viaje de Nefertari al otro mundo pueden ser contempladas en todo su esplendor. El que sigan manteniéndose así dependerá de que se logre un buen equilibrio entre el acceso del público y las limitaciones de entrada que exige su protección.



el origen de esa humedad. Algo de ella es evidente que lo introdujeron los muralistas al aplicar a las paredes de roca el enlucido húmedo. Sin embargo, aquella mezcla no habría bastado para que se formaran tan espesas capas de cristales. Una causa más probable del fenómeno es la muy ocasional pero fortísima lluvia que cae allí cada 50 años más o menos. Muchas tumbas de la región, incluidas las del Valle de los Reyes, se han inundado repetidamente desde la antigüedad. La infiltración de humedades salta a la vista en la tumba de Nefertari, sobre todo en la entrada. Es probable que el agua se deslizara entre las grietas, lixiviando a su paso la sal del lecho rocoso, y que después, al irse evaporando, dejara tras sí esa sal que se iría acumulando sobre las superficies pintadas de las paredes.

Para controlar la humedad y la temperatura, uno de nosotros (Maekawa) registró durante varios años y estaciones el clima exterior y el microclima de la tumba. Halló que en el exterior la temperatura variaba de los 40 grados Celsius en verano a los 10 grados Celsius en las mañanas de invierno; la humedad exterior cambiaba también mucho, del 80 % en invierno a sólo el 10 % durante el resto del año. Estas condiciones del exterior podían afectar al estado de las tumbas a través de los resquicios de la entrada, aunque en su mayor parte la temperatura del interior persistía en torno a los 29 grados Celsius y la humedad se estabilizó en torno al 50 por ciento. Notó además Maekawa que, en invierno, había allí una ventilación natural: el aire frío penetraba en la tumba hasta el nivel del suelo y expulsaba el aire caliente impeliéndolo hasta la entrada de la escalera. Este movimiento del aire hacía que las pinturas y el yeso del enlucido se mantuvieran secos. En cambio, cuando empezaron a menudear las visitas, aumentó drásticamente la humedad.

Maekawa cayó en la cuenta de que, al producirse la máxima afluencia turística durante el verano, precisamente cuando el aire no circula tanto hacia la salida de la tumba, en su interior podía quedar humedad concentrada. Y cuanto más húmedo estuviese su ambiente interno más probabilidades habría de que hongos y bacterias invadiesen las superficies de las pinturas, destruyéndolas, y de que se desarrollaran de nuevo los cristales de sal.

Además de controlar la temperatura y la humedad, Maekawa tuvo que vigilar los niveles de dióxido de carbono. Por ser escasa la ventilación natural de la tumba, este gas no sale de ella fácilmente y podría convertirse en riesgo para la salud de los turistas. El dióxido de carbono puede reaccionar con la mezcla del aire, produciendo ácido carbónico, que destiñe los murales. Maekawa comprobó que, cuando los turistas visitaban la tumba, la proporción de dióxido de carbono aumentaba de un promedio de 340 ppm (partes por millón) a otro de 2500 ppm. Por razones de salud, las proporciones no deberían pasar de 1000 ppm.

Basándose en estos datos, la Organización Arqueológica de Egipto —hoy Consejo Superior de Arqueología— ideó un medio de proteger la tumba, sin tener

que clausurarla. Se instalaron unas lámparas que dan muy poco calor y un sistema de ventilación que extrae el aire de la tumba y deja entrar en ella, sin filtrarlo, el aire seco del exterior para que reemplace el aire humidificado por las visitas. Desde finales de 1995 solamente se permite cada día la entrada a 150 visitantes, en grupos de 10 a 15 personas, y para estancias de no más de 15 minutos. Hasta la fecha, el único impacto notorio de la afluencia de visitantes ha sido un aumento del polvo, que adhiriéndose a las pinturas las ha oscurecido algo.

Hay que considerar muy en serio los daños que, a pesar del riguroso control, pueden causar las visitas, y hay que irlos evaluando periódicamente. Aunque el público debería poder contemplarlas libremente y experimentar siempre que quisiera el sobrecogedor misterio de esta puerta que se abre hacia nuestro pasado, hemos de establecer un equilibrio entre esa libertad y los daños que se seguirían de ejercerla sin limitaciones; tarea, por cierto, muy difícil y a la que, más allá de la tumba de Nefertari, le incumben también todos los demás yacimientos arqueológicos amenazados de deterioro o de destrucción. Siendo los daños irreversibles y acumulativos —y dado que hoy los humanos parecemos capaces de destruir en unos pocos lustros lo que había perdurado milenios—, tal vez no todos tengan auténtico derecho a entrar en cualquier sitio que se les antoje. Al fin y al cabo, lo que pretendió Ramsés II fue que su esposa disfrutase de una existencia tranquila, defendida con el sello de una inviolable imperturbabilidad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE GREAT BELZONI: ARCHEOLOGIST EXTRAORDINARY. Stanley Mayes, Walker, 1961.

ART AND ETERNITY: THE NEFERTARI WALL PAINTINGS CONSERVATION PROJECT 1986-1992. Dirigido por M. A. Corzo y M. Afshar. Getty Conservation Institute, Los Angeles, 1993.

LA VIDA DIARIA EN EL ANTIGUO EGIPTO. Andrea G. McDowell, en *Investigación y Ciencia*, páginas 60-65, febrero de 1997.

HOUSE OF ETERNITY, THE TOMB OF NEFERTARI. John K. McDonald. J. Paul Getty Museum, Los Angeles, 1996.

El océano oculto

Garabatos y manchas, suaves llanuras y criptoicebergs esculpen la superficie de esta luna de Júpiter, la más brillante. ¿Esconde un océano en su interior?

Robert T. Pappalardo, James W. Head y Ronald Greeley

¿Hay seres vivos en otros lugares de nuestro sistema solar o es la Tierra el único enclave capaz de albergar vida? Transcurridos treinta años desde que el hombre comenzara la exploración de planetas y satélites naturales en busca de respuesta, sólo queda un número restringido de posibles moradas de la vida. Quizá la más interesante sea Europa, luna helada de Júpiter.

Durante siglos los astrónomos conocieron de ese satélite sólo un puntito de luz, apenas perceptible ni siquiera con los telescopios más potentes. Pero llegaron los años sesenta y la espectroscopía nos mostró esa luna cubierta de hielo, igual que otros muchos cuerpos inhóspitos del sistema solar exterior. Con temperaturas en superficie de 110 grados kelvin cerca del ecuador y 50 grados kelvin en la vecindad de los polos, el hielo se torna duro caparazón. No había forma de que la investigación traspasara esa costra, ni abundaban los motivos para esperar que sus entrañas encerraran algo especial. Pero desde hace unos años, las espectaculares imágenes enviadas por las misiones espaciales han revelado una superficie joven y muy deformada. Bajo ese caparazón de hielo ha de existir, parece, un interior fluido y templado. ¿Se tratará acaso de hielo glacial? ¿O reinará en el interior de Europa calor bastante para mantener un océano de agua líquida? De probarse esto último, podríamos dejar que volase nuestra imaginación y preguntarnos si no habrá vida en sus oscuras profundidades.

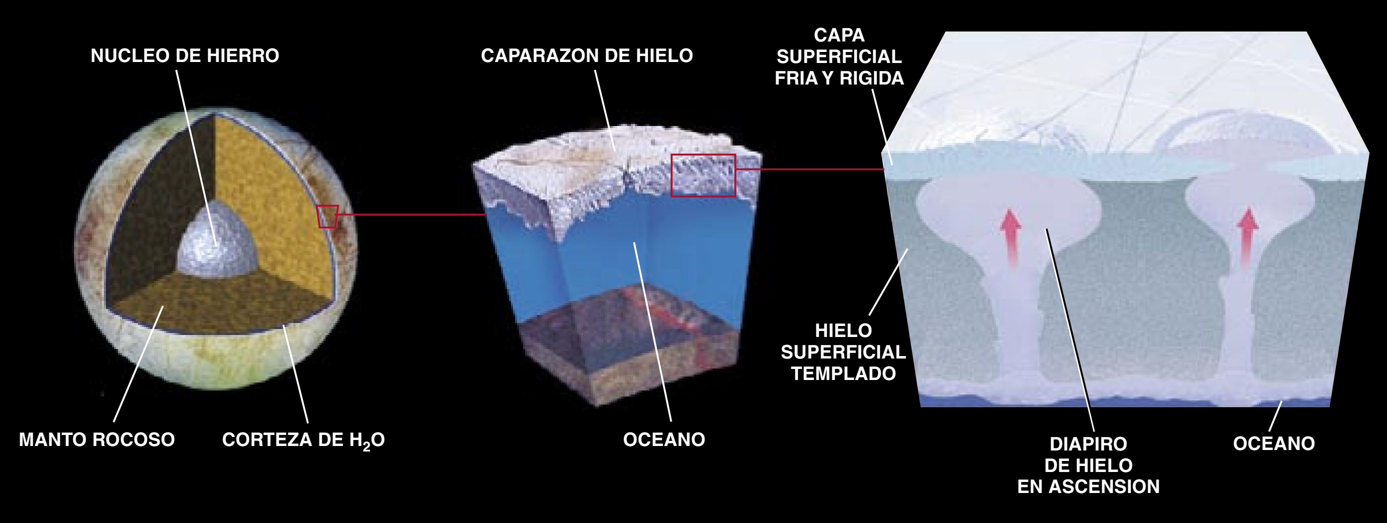
Los astrónomos llevan tiempo inquiriéndose qué se esconde dentro de Europa, con particular intensidad desde que los *Voyager* pasaron cerca de Júpiter y sus satélites en 1979. Por imperativo de la mecánica celeste, las naves no pudieron acercarse a Europa. Pese a ello, sacaron unas fotografías impresionantes. Europa se asemejaba, con sus brillantes llanuras cruzadas por bandas y crestas, a un ovillo de lana. Las caras opuestas de algunas de esas bandas oscuras, cuneiformes, encajaban perfectamente. Por alguna razón la brillante superficie de hielo se resquebrajó y liberó un material oscuro, lo bastante fluido como para llenar la consiguiente hendidura. Estas formaciones recuerdan las aberturas repletas de líquido entre las placas flotantes de hielo marino de la Tierra.

Lo que nadie esperaba es que los *Voyager* encontraran pocos cráteres grandes de impacto. Las superficies planetarias acumulan paulatinamente cráteres de impacto producidos por choques de cometas y asteroides. Si Europa apenas tiene cráteres visibles, es que los rellenaron en un pasado reciente fenómenos volcánicos o tectónicos. Basándose en el número de cometas cuyas órbitas se cruzan con Júpiter, Eugene Shoemaker dedujo que, en promedio, debía formarse un cráter de más de diez kilómetros de diámetro una vez cada 1,5 millones de años. Extrapolando los datos relativos a los cráteres de Europa conocidos, tendría que haber 45 cráteres de ese tamaño dispersos por el satélite; la edad de la superficie, pues, no superaría



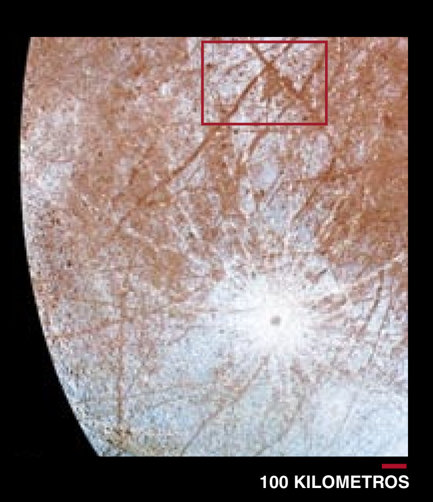
1. EL SEMBLANTE GLACIAL DE EUROPA se asemeja a una cáscara de huevo agrietada. Una materia rojiza se asoma por las fracturas que abren las fuerzas gravitatorias de Júpiter. Existen muy pocos cráteres, prueba de la juventud de la superficie. En esta imagen tomada por la nave *Galileo* los colores, aunque realzados, son auténticos. Otros instrumentos a bordo de la nave revelaron que el interior de Europa está formado en su mayor parte de roca, con una capa exterior de agua (en estado sólido o líquido) de cien kilómetros de grosor (*abajo, derecha*). La mayor parte de esa agua debe ser fluida o semifluida para explicar los accidentes del relieve, como los montículos circulares empujados hacia arriba por masas ascendentes de hielo, en comparación caliente (*derecha*), que de vez en cuando marcarían la superficie.

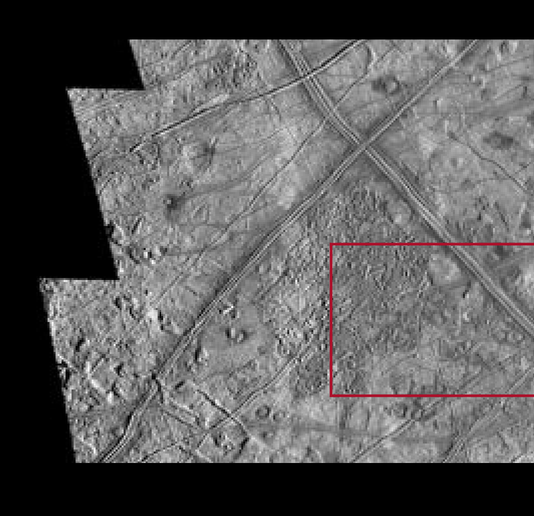
de Europa


NUCLEO DE HIERRO
MANTO ROCOSO
CORTEZA DE H_2O
CAPARAZON DE HIELO
OCEANO
CAPA SUPERFICIAL FRIA Y RIGIDA
HIELO SUPERFICIAL TEMPLADO
DIAPIRO DE HIELO EN ASCENSION
OCEANO

Aterrizaje suave en Europa







los 30 millones de años, un instante en la cronología geológica. Shoemaker apuntó que, si el interior estaba caliente, cabría también que los cráteres principales se hubiesen allanado con el paso del tiempo. Europa podría seguir activa.

Pero, ¿cómo confirmar la hipótesis? Las imágenes de los *Voyager* carecían de la resolución necesaria para identificar cráteres menores. Las llanuras brillantes se entremezclan con un terreno polícromo y cubierto de manchas oscuras, montículos y oquedades. Algunos adujeron que los cráteres se ocultarían tras esas peculiares regiones, en cuyo caso la superficie sería antigua. Además, ¿cómo iba a seguir activo un satélite? Cuerpos de un tamaño similar, nuestra Luna sin ir más lejos, son esferas inertes de roca que hace mucho perdieron la mayor parte de su calor interno, producido por la radiactividad. Europa debía estar ahora muerta y fría.

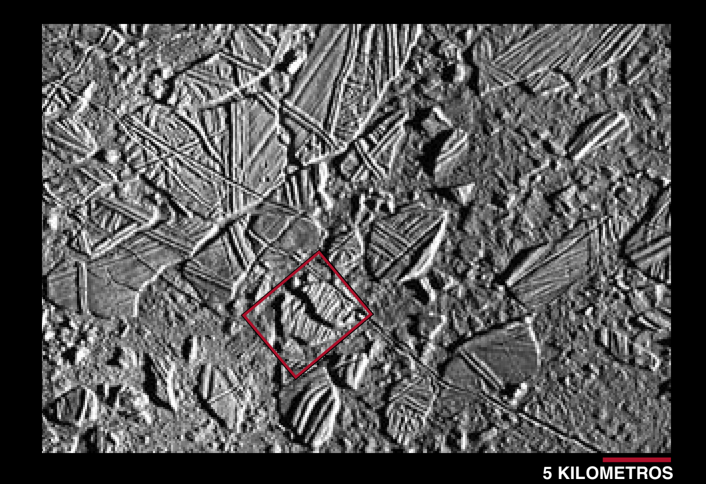
Las flexibles lunas de Júpiter

Por entonces se empezó a reconocer el poder de una fuente de calor exótica: la fricción por marea, proceso que genera la actividad volcánica en Io, vecina polícroma de Europa. De las cuatro lunas grandes de Júpiter —Io, Europa, Ganimedes y Calisto, que integran el conjunto de los satélites galileanos en honor a su descubridor—, las tres primeras describen un elegante baile orbital, la resonancia de Laplace. Con la precisión de un reloj suizo, cada vez que Ganimedes da una vuelta alrededor de Júpiter (con un período de 7,2 días terrestres), Europa describe dos órbitas (3,6 días) e Io cuatro (1,8 días). El tira y afloja gravitatorio que se produce en virtud de este fenómeno distorsiona sus órbitas y las vuelve muy elípticas. En cada revolución orbital se acercan y alejan del planeta; por ello en el cuerpo de



20 KILOMETROS

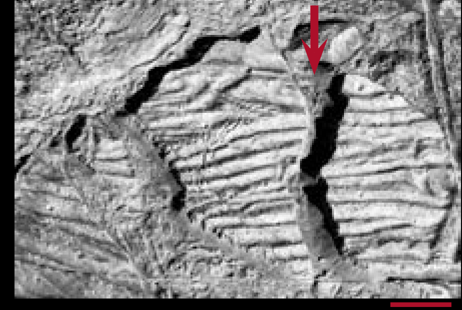
10 KILOMETROS



5 KILOMETROS



Visión simulada de los bloques de hielo, de unos tres kilómetros de ancho



1 KILOMETRO

2. BLOQUES GIGANTES DE HIELO del tamaño de una pequeña ciudad se descubren progresivamente en esta secuencia de imágenes de la nave *Galileo*. Una X colosal, formada por dos crestas (*primeras tres imágenes, fila superior*), viene bien para señalar el lugar, mientras las imágenes amplían la zona de *Caos de Conamara* (*dos imágenes siguientes*) hasta que llegan a verse bloques sueltos de hielo similares a los icebergs (*superior*). Hielo templado, hielo a medio derretir o agua líquida llenaron alguna vez el "mar", ahora helado, sobre el que se asientan los bloques. En el dibujo artístico (*izquierda*), que simula un punto de observación situado varios cientos de metros por encima de la superficie y que mira en dirección sur (*flecha en la imagen superior*), apreciamos la caída de tierra, cuesta abajo, conforme se van evaporando finas partículas de hielo.

los satélites suben y bajen mareas. Este movimiento de marea genera calor.

Los efectos son más profundos en Io, el satélite más cercano a Júpiter. La temperatura interna asciende hasta alcanzar la temperatura de fusión de la roca, lo que genera continuas erupciones volcánicas. Europa, que se encuentra a una distancia mayor, presenta menos temperatura. No obstante, los últimos cálculos indican que su interior podría permanecer lo bastante caliente como para fundir el hielo a una profundidad de 10 a 30 kilómetros y generar así un océano bajo su superficie.

Tras los *Voyager*, la comprobación mediante observaciones de la hipótesis del océano hubo de esperar veinte años, hasta la visita a los mundos descubiertos por Galileo de la nave bautizada con su nombre, que empezó a describir órbitas alrededor de Júpiter en diciembre de 1995. Desde entonces su trayectoria le lleva a pasar cerca de uno de los satélites galileanos cada pocos meses; junto a Europa ha volado ya una docena de veces.

Aunque la sonda *Galileo* no hubiera mandado a Tierra ni tan siquiera una imagen, nos habría proporcionado conocimientos fundamentales. En cada aproximación se han ido siguiendo las señales de radio de la nave con el fin de medir el campo gravitatorio de Europa. Dado que cualquier luna en rotación y distorsionada por las fuerzas de marea es un poco oblonga, está ligeramente achatada, su campo gravitatorio tampoco será esférico. La fuerza irregular produce pequeños cambios en la frecuencia de la señal de la sonda *Galileo* a partir de los cuales se ha podido cuantificar el grado de achatamiento de la luna y, con ello, la distribución de su masa interna (para una velocidad de rotación dada, un satélite cuya masa esté más concentrada en el centro será menos achatado que otro homogéneo).

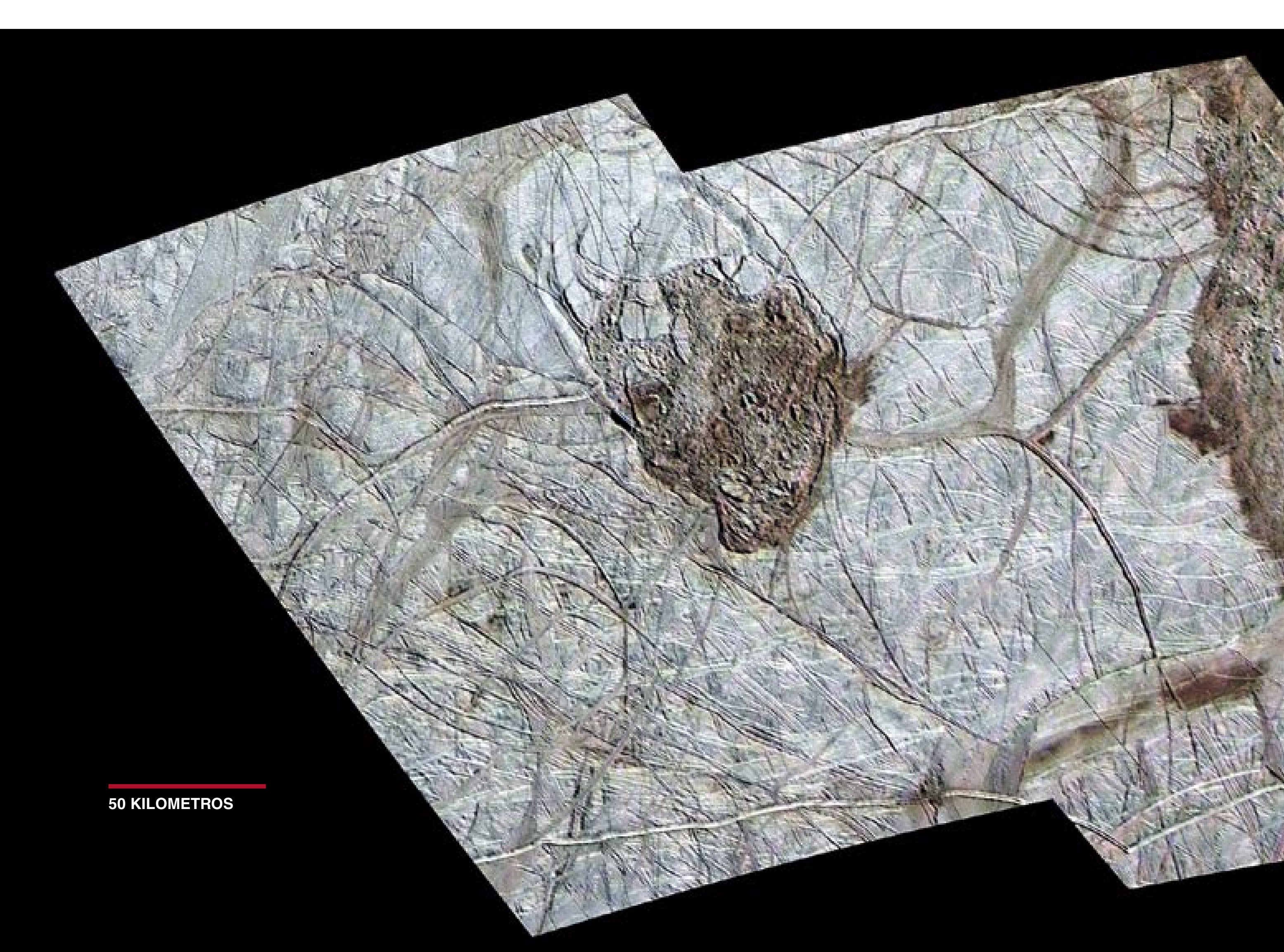
Tapices y cojinetes hidráulicos

Apoyados en su densidad promedio de 3,04 gramos por centímetro cúbico, deducimos que en Europa predominan formaciones rocosas. De los datos gravimétricos se desprende que la roca está emparedada entre un núcleo central de hierro y una corteza externa de H_2O. Si se tiene en cuenta el intervalo de valores probables de la densidad del núcleo de hierro y del manto de roca, la capa de agua vendría a alcanzar un grosor de entre 80 y 170 kilómetros (resulta verosímil cifrarla alrededor de 100). Si una parte considerable fuera líquida, su volumen superaría a todos los océanos terrestres juntos. Pero los datos sobre la gravedad proporcionados por la sonda *Galileo* no revelan si esta capa de agua es sólida del todo o líquida en parte.

Para resolver la cuestión, hemos de estudiar las imágenes. El equipo que analiza las que remite la sonda *Galileo* encontró en ellas un mundo sin parangón. Su superficie teje un lienzo complejo de fracturas, crestas, bandas y manchas. Cabe suponer que las fracturas se produjeron a medida que las fuerzas de marea alteraban la superficie de hielo hasta rajarla. Omnipresentes son también las crestas, que cortan la superficie a pares, con un valle estrecho en medio. Los modelos más factibles para explicar su formación se basan en la ascensión de agua líquida o de hielo templado por las fracturas. Un "magma" acuoso o helado podría haber forzado hacia arriba el hielo rígido situado cerca de la superficie, deformándolo hasta configurarlo como una cresta doble. Cabría también que una erupción superficial de lodo de hielo hubiese levantado cada cresta. También se aprecian muchas crestas en paralelo, que dan a entender que el proceso podría repetirse y crear unas crestas al lado de otras. Las más anchas acostumbran rodeadarse de franjas oscuras, rojizas, de contornos difusos. Es posible que el golpe de calor asociado a la formación de las crestas fuera responsable de la creación de estos márgenes oscuros, ya se tratase de vulcanismo helado o de la sublimación de una superficie helada sucia. Sea cual fuere el mecanismo de formación, las crestas revelan una historia geológica dinámica y una subsuperficie caliente.

A partir de los garabatos que parecen dibujar al azar las fracturas y las crestas se ha intentado comprender el estiramiento y distorsión de Europa. La fricción por marea produce un patrón distintivo, al que se atienen algunas de las grietas y crestas mejor conservadas. Pero debe de estar ocurriendo algo más. Aunque parezca extraño, da la impresión de que el patrón de tensiones ha ido barriendo con el tiempo la superficie.

El patrón quedaría explicado si la superficie de Europa hubiese estado girando a mayor velocidad que su interior. La mayoría de los satélites del sistema solar se encuentran en rotación sincrónica: por acción de las fuerzas de marea, dan exactamente un giro alrededor de sí mismos por cada revolución orbital, mostrando siempre la misma cara a su planeta progenitor. (Por esa causa siempre vemos desde la Tierra la misma parte de nuestra luna y se nos veda su "cara oculta".) Pero si disociásemos —separásemos mecánicamente— del interior rocoso de Europa su superficie helada, la gravedad de Júpiter haría que la superficie girase a una velocidad un poco mayor

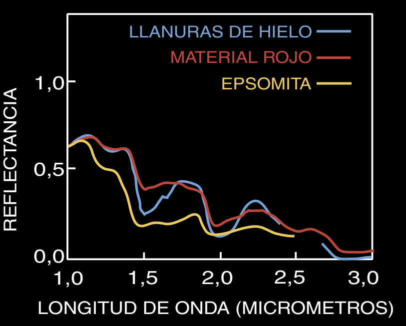


que la sincrónica. Un océano subsuperficial podría fácilmente actuar como un cojinete que hiciera que la capa de hielo flotante girase de forma no sincrónica.

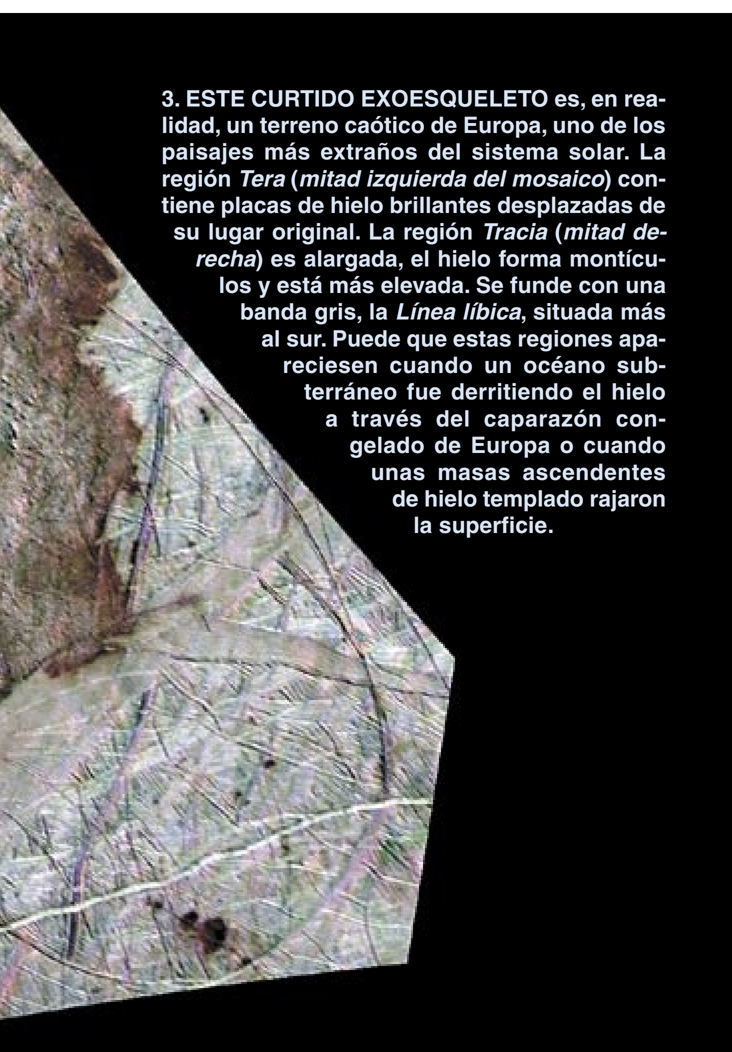
No puede asegurarse si en la actualidad la rotación no es sincrónica o si la superficie guarda un antiguo patrón de alineaciones ahora inactivas. Al comparar la localización de los accidentes de Europa según las imágenes de la Galileo y según las de los *Voyager*, se advierte que no ha acontecido ningún cambio mensurable en los veinte años que las separan. Con relación al interior, la superficie no puede estar girando ahora a un ritmo superior a una vez cada diez mil años, como mucho.

La cámara instalada a bordo de la sonda *Galileo* también se detuvo en las bandas oscuras, cuneiformes, donde las imágenes de baja resolución de los *Voyager* apuntaban a una separación completa de las llanuras surcadas por las crestas. Análisis más recientes confirmaron que las partes opuestas de estas bandas encajaban a la perfección. El material oscuro que se encuentra entre ellas presenta estrías muy finas y, por lo general, se aprecia un surco central prominente y cierto grado de simetría. Estas bandas podrían ser los equivalentes glaciales de los centros de expansión que encontramos en el fondo de los océanos terrestres, donde las placas tectónicas se separan y aflora roca nueva. De ser cierto, el hielo que está bajo la superficie debía ser móvil y templado en el momento en que esas formaciones se crearon. Sin embargo, la tectónica de placas es un juego de suma cero: si una parte del material emerge del interior, otra habrá de descender. En la Tierra esa subducción ocurre en determinadas zonas; en Europa aún no se ha identificado ninguna zona de subducción.





4. SE VEN MANCHAS ROJIZAS en los lugares donde se produjo una emanación de líquido salado sobre la superficie de Europa (*izquierda*). Las mediciones espectrales (*derecha*) señalaron que las brillantes llanuras que las rodean (*azul*) constan, sobre todo, de agua helada. El material rojizo (*rojo*) se asemeja mucho al espectro de laboratorio del sulfato magnésico, o epsomita (*amarillo*).



3. ESTE CURTIDO EXOESQUELETO es, en realidad, un terreno caótico de Europa, uno de los paisajes más extraños del sistema solar. La región *Tera* (*mitad izquierda del mosaico*) contiene placas de hielo brillantes desplazadas de su lugar original. La región *Tracia* (*mitad derecha*) es alargada, el hielo forma montículos y está más elevada. Se funde con una banda gris, la *Línea líbica*, situada más al sur. Puede que estas regiones apareciesen cuando un océano subterráneo fue derritiendo el hielo a través del caparazón congelado de Europa o cuando unas masas ascendentes de hielo templado rajaron la superficie.

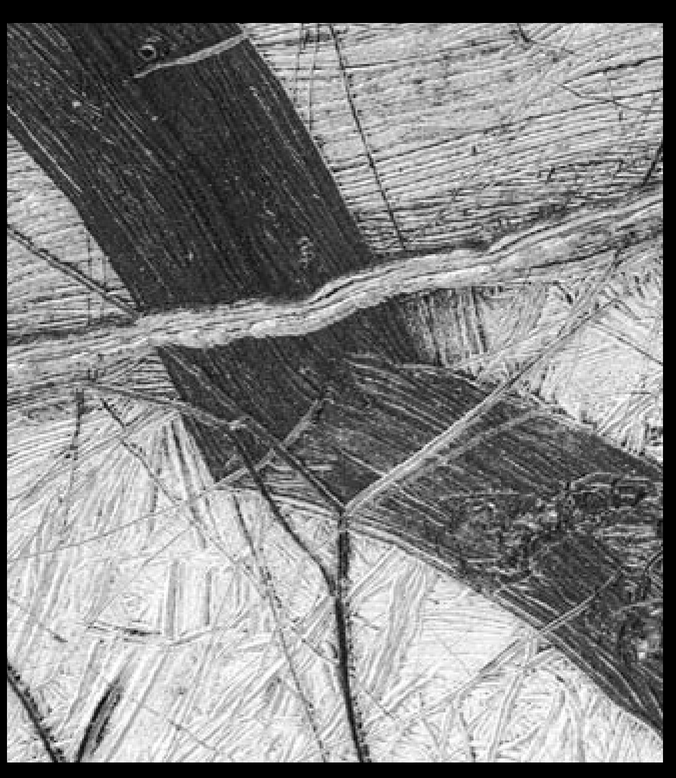
Masas de hielo templado

El misterioso terreno polícromo proporciona más pistas acerca del interior de Europa. Las imágenes del terreno que tomó la nave *Galileo* son de diez a cien veces más detalladas que las de los *Voyager*. Evidencian un terreno salpicado de accidentes circulares y elípticos denominados *lenticulae* ("pecas") por el equipo que analiza las imágenes. Muchos son domos, algunos fosas o manchas oscuras lisas; otros tienen una textura rugosa y enmarañada. Las cimas de los domos guardan semejanza con algunas zonas de las llanuras más antiguas cruzadas por crestas, indicio de que aquéllos se formaron al sufrir las llanuras un empuje desde abajo.

Podría explicarse la variedad de *lenticulae* apelando a la conducta del caparazón helado: se hubiera comportado como una lámpara de lava planetaria, con masas de hielo templado que emergieran a través del hielo más frío situado bajo la superficie. En ese caso, se levantarían los domos al ejercer esas masas presión sobre la parte interior de la superficie. Las texturas rugosas podrían indicarnos las zonas donde esas masas rajaron y destruyeron las llanuras. Las manchas oscuras lisas podrían ser agua de fusión liberada por las masas ascendentes y congeladas de nuevo rápidamente.

Las masas de hielo —*diapiros*— se acumularían de forma natural si el caparazón helado de Europa flotase sobre agua líquida. En estas circunstancias, las flexiones generadas por las mareas inyectarían calor en la base del caparazón, donde el hielo está cerca del punto de fusión y se deforma con mayor facilidad. El hielo templado es menos denso que el hielo frío que tiene encima, y por tanto tiende a subir. Si el caparazón de hielo es lo bastante denso, las fuerzas ascensionales superarán la resistencia viscosa a fluir (que disminuye conforme aumenta la profundidad). Como la cera mineral que sube en una lámpara de lava, los *diapiros* de hielo templado alcanzarían la superficie, donde crearían las "pecas". Los modelos dicen que el caparazón presentaría un espesor mínimo de 10 kilómetros.





5. LAS FISURAS DEL HIELO en la Tierra (*izquierda*) y Europa (*derecha*) guardan cierta semejanza. Al fracturarse el hielo en los océanos polares de la Tierra se ve agua, más oscura, que se congela rápidamente. Las fisuras pueden cerrarse y levantar crestas. En Europa, sin embargo, se cree que las bandas oscuras y crestas emparejadas son el resultado de procesos tectónicos. La escala es muy dispar: la fractura en el hielo del mar mide cien metros de ancho; más de quince kilómetros, la banda oscura de Europa.

Además de las *lenticulae*, el terreno veteado contiene el rasgo más espectacular del relieve de Europa: las regiones de "caos". Diríase que en estas zonas hay restos de hielo remanentes de anteriores llanuras cruzadas por crestas, que se hubiesen empotrado en una matriz de hielo de por sí ya accidentada, como icebergs que se desprenden y caen a un mar a medias helado, a medias líquido. La disposición original de esos bloques de hielo semejantes a los icebergs se puede reconstruir cual si se tratase de un rompecabezas. Eso es lo que se ha hecho con una de esas zonas, el *Caos de Conamara*. Si estas regiones se formaron al ir el agua subsuperficial fundiendo hielo a través del caparazón de Europa, que luego se volvió a congelar, la imagen del iceberg podría ir bien encaminada. Cabe también que uno o más diapiros ascendiesen hacia la superficie y calentasen el hielo cercano a ésta, creando un lecho de hielo y líquido mezclados sobre el que se deslizarían libres los bloques de hielo resquebrajados y desplazados de su sitio original. En cualquier caso, las regiones "caóticas" hablan de una subsuperficie templada y de al menos una fusión parcial.

Sin embargo, hay un tipo de accidente que brilla por su ausencia en el terreno jaspeado. Nos referimos a cráteres de impacto pequeños. Ello nos mueve a pensar en una superficie joven. Desarrollando los cálculos de edad que realizó Shoemaker, se han ideado modelos de los cometas y asteroides del sistema solar para determinar con qué frecuencia se estrellan contra Europa. Coinciden con la sugerencia de Shoemaker de que son sobre todo los cometas los que chocan contra los satélites galileanos, dado el número insuficiente de asteroides. A partir de la cantidad, presumida y observada, de cometas que se encuentran en las cercanías de Júpiter —incluyendo el Shoemaker-Levy 9 que chocó contra el gigante de gas en julio de 1994—, se calcula que la superficie de Europa, con tan reducido número de cráteres, tiene una antigüedad de 10 a 250 millones de años. En términos geológicos se trata de una edad cortísima y, por tanto, parece probable que Europa siga activo incluso hoy día, pese a que no se han encontrado indicios de vulcanismo como en Io.

La escasez de cráteres en la superficie de Europa se convierte en parámetro del grosor del caparazón de hielo. A diferencia de los cráteres de impacto con forma de cuenco o de base plana que encontramos en otros mundos, las dos mayores formaciones de impacto de Europa ofrecen una zona central lisa, rodeada de anillos concéntricos. Las explosiones que crearon estas huellas tuvieron que penetrar en el hielo rígido cercano a la superficie hasta alcanzar una capa inferior más débil. Incapaz la capa menos resistente de mantener una configuración de cráter, el hielo a medio derretir y el ya derretido ocuparían el hueco, arrastrando hacia el interior el hielo cercano a la superficie y recortando en ésta los anillos concéntricos. En esencia, los anillos vienen a ser el recuerdo congelado de una piedra arrojada a un estanque, una roca y un estanque muy grandes. A partir de la huella visible, se calculan las dimensiones del impacto original. La profundidad de la capa menos resistente es de seis a quince kilómetros, cifra que concuerda en términos generales con los valores que dan los

ROBERT T. PAPPALARDO, JAMES W. HEAD y RONALD GREELEY han trabajado juntos durante varios años en el equipo de análisis de imágenes del proyecto *Galileo*. Pappalardo, asociado a la Universidad Brown, colabora con varios museos de la ciencia en la preparación de exposiciones sobre los descubrimientos planetarios. Head enseña geología en la misma universidad y ha participado en las principales misiones planetarias importantes. Greeley, otro veterano de la ciencia planetaria, da clases ahora en la Universidad estatal de Arizona.

modelos de las masas ascendentes de hielo y la teoría del calentamiento generado por las mareas. Pero algunas de las regiones de la corteza helada de Europa podrían ser mucho más delgadas que otras, cuestión disputada hoy entre los astrónomos.

Las bandas observadas por el NIMS

Además de su cámara, la sonda *Galileo* llevaba a bordo un espectrómetro cartográfico sensible al infrarrojo cercano (el instrumento NIMS), que ha analizado la luz reflejada por la superficie de Europa. Tal como se esperaba, NIMS encontró las bandas espectrales características del agua helada. Sin embargo, las bandas son oblicuas y tienen formas asimétricas, signo de que hay impurezas en el hielo, especialmente en las zonas que en las longitudes de onda visibles aparecen más oscuras y rojizas. Uno de los principales sospechosos es una sal, sulfato magnésico en concreto. De ser correcta esta deducción, Europa contaría con las mayores concentraciones de epsomita del sistema solar.

Ya que las sales en general carecen de color o son blancas, tiene que haber también algún otro tipo de material que explique la tonalidad rojiza. Mientras se trata de dilucidar la identidad del elemento contaminante, las sospechas recaen en compuestos del azufre y el hierro. Antes de la misión *Galileo*, algunos habían predicho que el océano interno de Europa sería salado, fundados en que muchos meteoritos contienen sales. Los materiales presentes en la superficie de Europa quizás estén mostrándonos la química de un océano oculto moderadamente salado.

Refuerzan la hipótesis oceánica dos instrumentos más, instalados a bordo de la nave *Galileo*. El fotopolarímetro-radiómetro midió temperaturas en toda la superficie del satélite. De noche, las latitudes superiores muestran una temperatura anómala (unos cinco kelvin más) en comparación con las regiones del ecuador. Esta desviación podría corroborar que, además del calentamiento externo por acción de los rayos solares, Europa cuenta con una poderosa fuente de calor interno, a saber, la fricción por mareas.

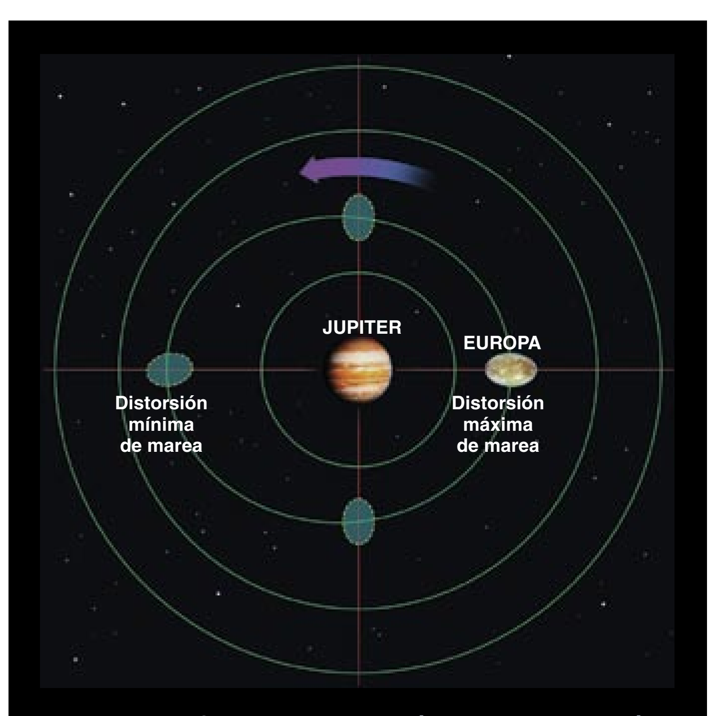
El equipo encargado del magnetómetro de la sonda espacial ha aportado una de las indicaciones más fascinantes del estado actual del interior de Europa. Los satélites galileanos se hallan inmersos en el intenso campo magnético de Júpiter. Las mediciones del campo ambiental en la vecindad de Europa muestran desviaciones asociadas con el satélite. Estas desviaciones tendrían justificación si Europa contara con un campo magnético intrínseco, sólo que el eje magnético debería tender un ángulo demasiado inclinado con respecto al eje de rotación. Otra posibilidad es que la subsuperficie de Europa fuese un conductor eléctrico y respondiese al campo magnético joviano con un campo inducido propio. Según esta hipótesis, el conductor interno tendría que ser tan conductivo como el agua salada.

Para mayor sorpresa, el magnetómetro detectó también un campo similar cerca de Calisto, un satélite cuya superficie está repleta de cráteres sin indicio alguno de la existencia de un océano interno. La posibilidad de que todos los grandes satélites helados del sistema solar posean océanos salados en su interior, como vestigios de un pasado más cálido, resulta emocionante. La última aproximación de *Galileo* a Europa, prevista para enero del 2000, estará dedicada a determinar la fuente de este campo.



6. LA FORMA EN OJO DE BUEY del punto de impacto *Mácula de Tiro* —uno de los pocos cráteres grandes de Europa— apunta la presencia de agua en estado líquido. La depresión central mide 40 kilómetros de ancho. Los anillos concéntricos son fracturas producidas cuando el cráter se desplomó hacia dentro. Acribillan la superficie otros cráteres secundarios pequeños, excavados por los restos del impacto. Las líneas negras indican lagunas en el conjunto de datos.

La teoría y la observación se han unido para ofrecer coherentes y firmes razones en favor de la existencia, en la actualidad, de un océano global en el interior de Europa. Pero aún no ha podido demostrarse de modo contundente tal realidad. El hielo templado que subyace



7. LA DANZA ORBITAL de los satélites mayores de Júpiter determina que Europa adopte una órbita elíptica. En razón de ello, las fuerzas de marea de Júpiter, que dan a Europa una forma oblonga, son más intensas en ciertos puntos de la órbita de ésta que en otros. (Ni órbitas, ni lunas, ni planeta, ni efectos de marea se han representado a escala.)

El lago del que se olvidó el tiempo

Frank D. Carsey y Joan C. Horvath

Si alguna vez ha habido un lugar perdido en medio de la nada, ése es el lago Vostok, en la Antártida. Para llegar hasta allí primero hay que pasar por la base científica rusa del mismo nombre, famosa por su clima: el peor del mundo. A continuación, tendríamos que perforar cuatro kilómetros en el hielo, para alcanzar, aislada del mundo exterior desde hace millones de años, una reserva de agua potable cuya extensión es similar a la del lago Ontario y es el doble de profunda. Posiblemente se trate de lo más parecido que hay en la Tierra al hipotético océano de Europa.

La primera noticia de ese lago perdido llegó en los años setenta. Lo descubrió un radar de sondeo aéreo, que penetraba el hielo y se reflejaba en la roca o el agua que hubiese debajo. La intensidad de la señal reflejada y la geometría plana de la superficie situada bajo el hielo revelaban la existencia de agua, como se confirmó más adelante al volver a examinar viejos datos sísmicos rusos. Pero la ciencia no conoció la verdadera dimensión del lago hasta 1996, tras la exploración de la lisa superficie de su cubierta helada, sondeada por el *Satélite Europeo de Detección Remota*. No se han realizado todavía perforaciones, aunque existen planes para ello.

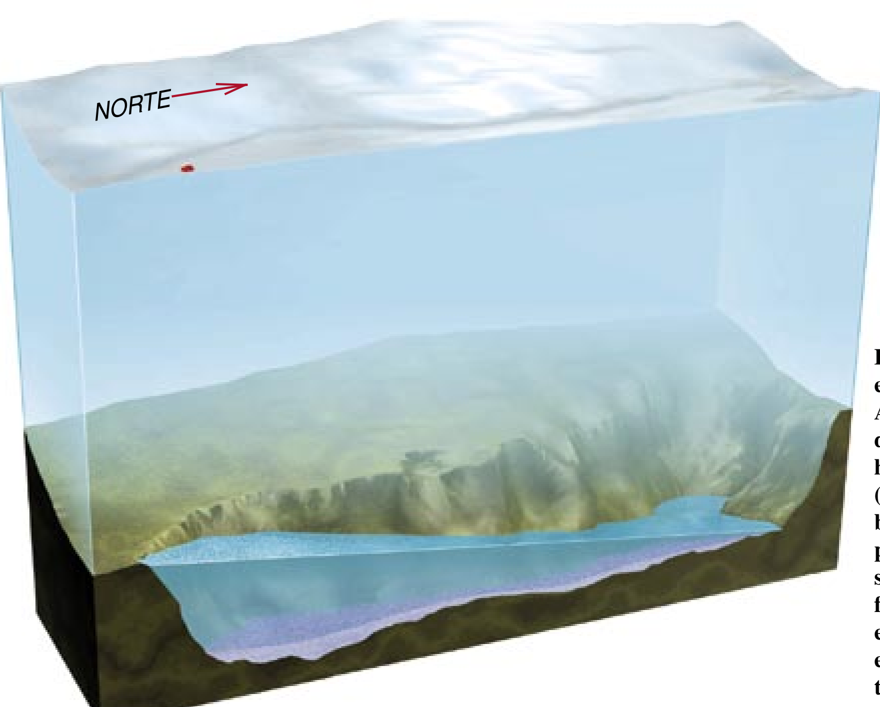
La superficie de hielo alcanza una altura de 3700 metros y la del lago está situada justo por debajo del nivel del mar. A juzgar por los perfiles de la roca viva circundante, es posible que la cuenca del lago sea una depresión tectónica, una zona fallada como el mar Rojo o el lago Baikal. ¿Por qué hay agua en vez de hielo? Algunas pruebas geológicas sugieren la presencia de un punto caliente similar, aunque menor, al que se atribuye el levantamiento del archipiélago de Hawai. Mas, aun cuando no lo hubiera el calor que llega del interior de la Tierra basta para alcanzar el punto de fusión local debido al efecto aislante del hielo. No escasean en la Antártida los lagos sumergidos debajo. Vostok es el mayor de todos.

Al tiempo que británicos y rusos cartografiaban el lago Vostok, otros lugares nos demostraban cuán importantes eran para la ciencia las aguas prístinas del lago. Aparecían microbios en medios inhóspitos —alrededor de chimeneas volcánicas de profundidades marinas, en lagos de la propia Antártida menos profundos y cubiertos también de hielo, en lagos alcalinos como el lago Mono de California— que sólo compartían la presencia de agua en estado líquido. Mientras tanto, la misión *Galileo* iba descubriendo que Europa podría tener un océano sumergido bajo el hielo de su superficie. La potencia de la cubierta de hielo en el Vostok y en Europa es similar, y salvo por la presión más reducida en Europa (su gravedad es una séptima parte de la terrestre), las condiciones en ambos podrían ser comparables. Si la vida ha colonizado el Vostok, cabe pensar que también haya encontrado un nicho en Europa.

Hace tres años propusimos, con otros investigadores del Laboratorio de Propulsión a Chorro, la exploración de estos dos enclaves siguiendo una estrategia básica común. Vostok podría beneficiarse de la técnica desarrollada para Europa al tiempo que podría ensayarse un explorador de Europa cerca de casa. En colaboración con expertos del Instituto Oceanográfico de Woods Hole y de la Universidad de Nebraska investigamos la viabilidad de dos ingenios cibernéticos: un "criobot" que se abriese camino a través del hielo fundiéndolo y un submarino en pequeño, "hidrobot", que buscara formas de vida y realizase determinadas mediciones.

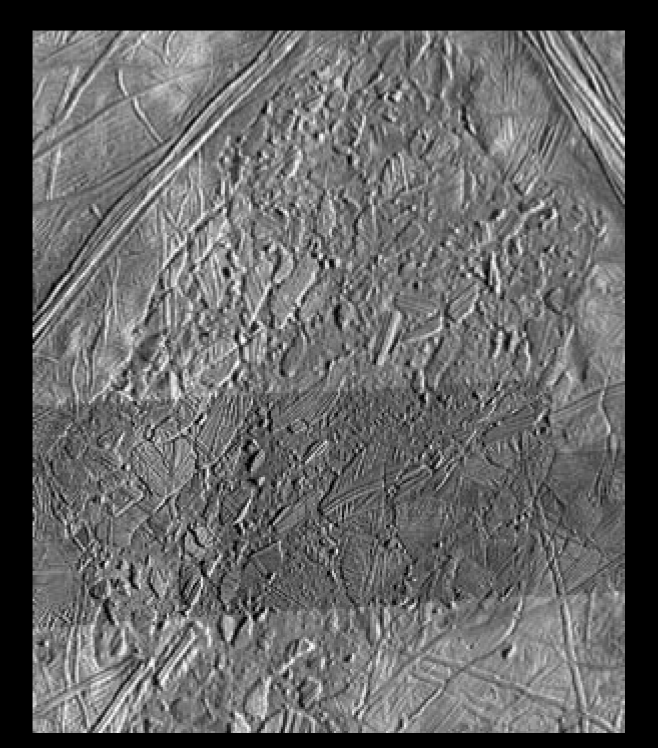
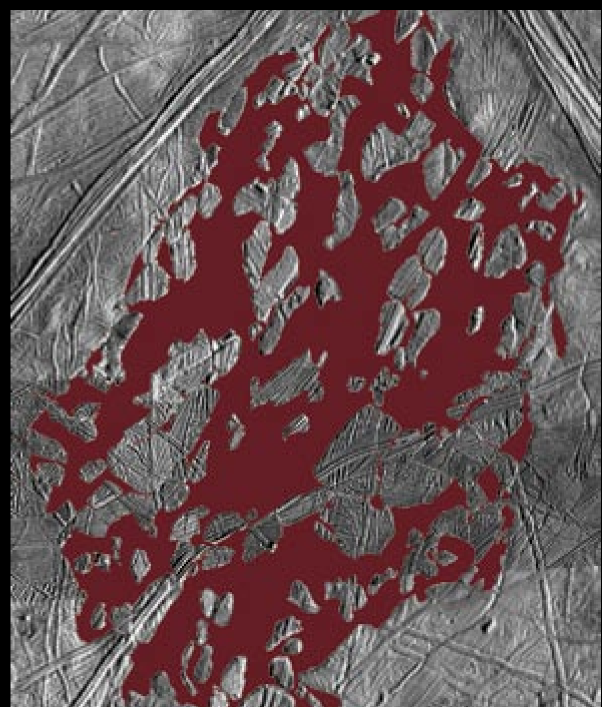
Huelga decir que será difícil diseñarlos. Las altas presiones en los mares subsuperficiales —que superan las de la cubierta del sumergido *Titanic*— parecen exigir un "hidrobot" grande, acorazado, pero no es fácil enviar a Europa una máquina voluminosa. Tendría que ser autónomo y capaz de responder a un ambiente complejo, con rocas, grietas, etc. Los pequeños laboratorios químicos que albergaría en su interior habrían de estudiar el entorno y reconocer los microorganismos, aun cuando no se parecieran en nada a los habituales. Y ambos aparatos deberían estar totalmente esterilizados, de modo que no contaminasen el agua con microbios comunes. El cumplimiento de estos requisitos no está al alcance de las técnicas actuales de perforación del hielo y sumergibles en miniatura. El plan es comenzar la exploración del lago Vostok en el 2003 y la de Europa una década más tarde quizá.

FRANK D. CARSEY y JOAN C. HORVATH dirigieron la Iniciativa Lago Vostok-Europa en el Instituto de Tecnología de California en Pasadena.





EL LAGO VOSTOK permanece oculto en una depresión de la zona este de la Antártida, cubierto por cuatro kilómetros de hielo que se desplaza lentamente. El hielo flota a la manera de los icebergs (*izquierda*); para soportar una ligera subida de la superficie de hielo, la del lago presenta una inclinación descendente de sur a norte de unos 400 metros. En el fondo podrían hallarse sedimentos. La estación rusa Vostok está justo sobre el extremo sur (*punto rojo*). (La escala vertical está distorsionada.)

8. COMO UN ROMPECABEZAS puede recomponerse la región *Caos de Conamara*. La nave *Galileo* observó un conjunto de bloques de hielo insertados y girados en una matriz helada (*izquierda*). La reconstrucción (*derecha*) ha logrado identificar la matriz (*rojo*) y devuelto los bloques desprendidos de las crestas, en la medida de lo posible, a su localización original. Pero más de la mitad de las piezas ha desaparecido, integrada en la matriz. Esta intrincada región da fe de la vivacidad geológica de Europa.

bajo la superficie podría reproducir los efectos de un océano interno. Aunque la superficie del satélite está casi desprovista de cráteres y su edad es corta desde el punto de vista geológico, la búsqueda de pruebas definitivas de actividad geológica en el momento presente ha resultado infructuosa. Es posible que Europa tuviera un océano en un pasado reciente y que ahora se encuentre totalmente helado. Sólo queda un modo de descubrirlo: enviar una sonda a Europa y entrar esta vez en órbita a su alrededor.

Y esto es precisamente lo que se propone la NASA. Para noviembre del 2003 está previsto el lanzamiento de la misión *Europa Orbiter*; la entrada en la órbita de Júpiter se produciría tres años más tarde. Unos dos años después, la nave entraría en órbita alrededor de Europa a una altura media de 200 kilómetros. Un seguimiento riguroso de su posición y altitud cartografiaría el campo gravitatorio y el relieve de Europa con el detalle suficiente como para determinar el movimiento de las mareas durante su trayectoria alrededor de Júpiter. Con un océano en el interior, la superficie de Europa registrará movimientos ascendentes y descendentes de 30 metros cada órbita de 3,6 días; de no ser así, el abombamiento causado por la marea será de tan sólo un metro. *Europa Orbiter* aportaría la prueba crucial de la hipótesis del océano.

La cámara de la nave fotografiará el satélite y el radar sondeará la subsuperficie en busca de zonas poco profundas donde el hielo esté fundido. Según la temperatura del hielo y su pureza, la señal de radar podría incluso atravesar la capa de hielo de Europa y detectar un océano que estuviese debajo, tal y como se cartografió recientemente el lago Vostok, en la Antártida, bajo cuatro kilómetros de frío hielo glacial.

La vida, tal como la conocemos y la entendemos, requiere tres ingredientes básicos: energía, carbono y agua en estado líquido. En Europa podrían estar presentes los tres. La fricción mareal calentaría la capa de roca y daría lugar a actividad volcánica en el fondo del océano de Europa. En las regiones volcánicas de los océanos terrestres el agua circula a través de las rocas calientes y emerge enriquecida en nutrientes químicos. En estos cálidos oasis medran formas variopintas de vida. Pero dependen en gran medida del ecosistema de la superficie; por ejemplo, el oxígeno disuelto en el agua del mar proviene de la fotosíntesis. La vida en las profundidades del océano de Europa se encontraría desamparada, ya que los medios de energía química disponibles serían muy limitados. Aunque podría subsistir la vida microbiana, seguramente no sobrevivirían organismos complejos, del tipo de los que habitan los océanos de la Tierra.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EUROPA: INITIAL GALILEO GEOLOGICAL OBSERVATIONS. Ronald Greeley et al. en *Icarus*, vol. 135, págs. 4-24, septiembre, 1998.

THE NEW SOLAR SYSTEM. Cuarta edición. Dirigido por J. Kelly Beatty, Carolyn Collins Petersen y Andrew Chaikin. Cambridge University Press, 1998.

La página Web del proyecto Galileo puede verse en www.jpl.nasa.gov/galileo.

La página Web del Europa Orbiter puede verse en www.jpl.nasa.gov/ice_fire//europao.htm.

Por qué se rompen los objetos

Desde principios de siglo se sabe que los cuerpos se quiebran o deforman en razón de sus enlaces químicos. Se ha dado un paso más y ahora se predice qué tipo de degradación se producirá

Mark E. Eberhart

La rotura o deformación de un objeto es un pequeño drama para el común de los mortales. Para mí suele ser todo un acontecimiento. Cuando veo un cristal roto, empiezo a reagrupar los fragmentos e imaginar la evolución de la fractura en sentido inverso. En otras ocasiones me detengo ante un árbol añoso para reconstruir de qué modo su crecimiento ha retorcido la verja de hierro. No abrigo ningún interés perverso por la destrucción, sino que me mueve descubrir cuándo un material se quiebra en seguida (es frágil como el vidrio) y cuándo requiere para ello más energía (es dúctil como el hierro).

La historia de la técnica refleja el aprovechamiento de las posibilidades de estos dos tipos de rotura. El control de la fractura frágil del sílex le franqueó al hombre la entrada en la primera era técnica, la Edad de Piedra, hace 2,5 millones de años. En una fecha más cercana, 5000 años atrás, el descubrimiento de sustancias resistentes a la fractura frágil, como el oro y el cobre, allanó el camino hacia la Edad de los Metales. Los artesanos de la antigüedad hallaron que estos metales dúctiles eran adecuados para fabricar joyas y adornos, con una blandura que permitía su extensión y moldeo. Pero a pesar de que estos materiales absorben grandes cantidades de energía cuando se deforman, su vida es corta si se los utiliza para cortar o raspar.

La fabricación de todo tipo de objetos —desde espadas hasta rascacielos— requiere compuestos lo bastante resistentes para mantener su forma bajo presión y lo bastante maleables para no romperse en pedazos. Esta es la razón por la que los metales se han vuelto omnipresentes en nuestra cultura: es el único grupo de elementos químicos que muestran un comportamiento frágil y dúctil. Las herramientas y armas de piedra perdieron interés, cuando la gente aprendió que la mezcla de cobre con estaño producía un metal más resistente y maleable, el bronce.

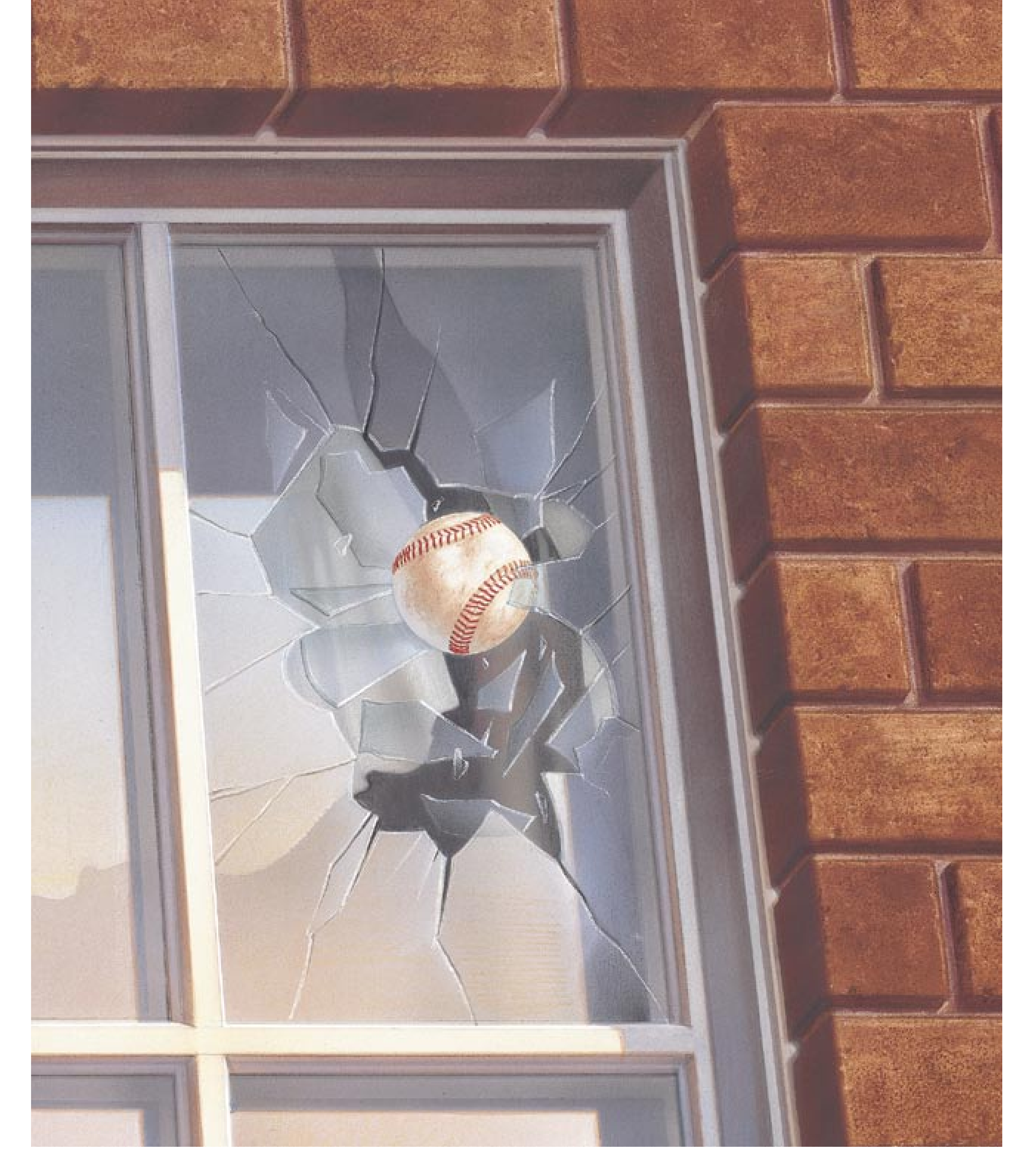
Más duras incluso que el bronce son las aleaciones de hierro y carbono, cuyo empleo no se generalizó hasta el año 1000 antes de Cristo, cuando los metalúrgicos inventaron hornos lo bastante calientes para extraer el hierro de su mena. Las aleaciones de hierro y carbono son duras, pero no pueden absorber mucha energía sin romperse. Los metalúrgicos aprendieron pronto que, si se inyectaba aire en la aleación, su contenido en carbono se reducía y el metal se volvía más dúctil; así se obtuvo el primer acero. Desde entonces, la técnica ha progresado a la par que la capacidad de idear materiales con diferentes grados de ductilidad y fragilidad.

Defectos fatales

A pesar de esta remotísima conexión entre progreso técnico y propiedades de los materiales, hasta el siglo XX no se dispuso de una explicación científica del mecanismo de ruptura. Pero la complejidad microscópica de muchos detalles de estos procesos persiste envuelta en el misterio. Por ejemplo, no se comprende por qué la adición de tres átomos de hidrógeno por cada millón de átomos de hierro hace de un acero dúctil un cuerpo peligrosamente quebradizo. Durante los últimos veinte años, con objeto de responder a esta y otras cuestiones, he recurrido a la química molecular para predecir cómo se rompen los materiales. Mi propósito es diseñar materiales que se rompan en el instante deseado. Para conseguirlo, tuve que abordar primero la naturaleza de la ruptura del enlace químico.

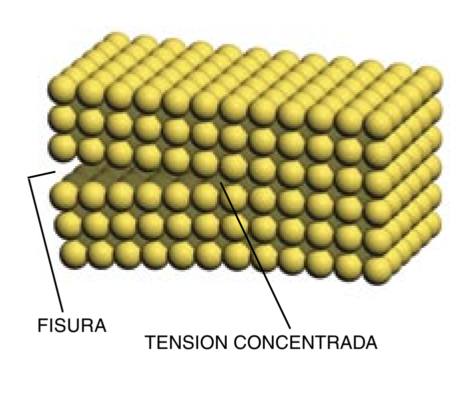
A principios de siglo se dio un paso importante en la comprensión científica del fallo de los materiales, al conocerse que un sólido era un conjunto de átomos unidos mediante enlaces químicos. En un comienzo, los químicos representaron los enlaces a modo de varillas que unían pares de

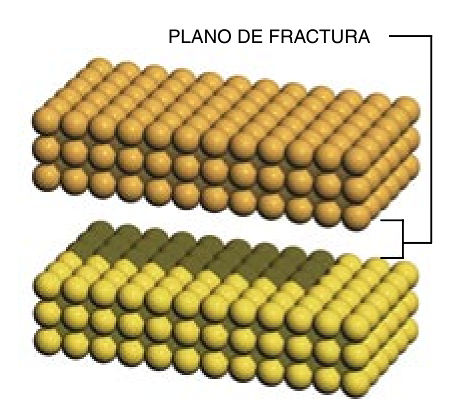
1. LOS BATES Y LAS PELOTAS no se rompen en el golpe, porque pueden absorber la energía de impacto. En cambio, una ventana de cristal se hace añicos. El comportamiento de los objetos que sufren una fuerza depende de los enlaces químicos entre sus átomos.

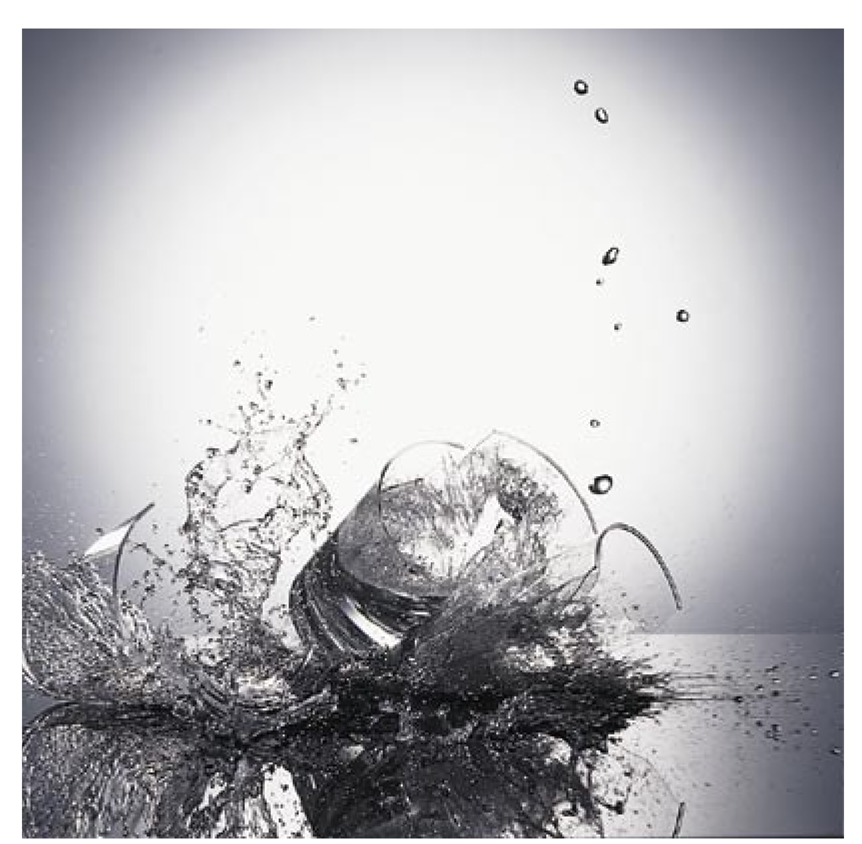


átomos. Los cuerpos parecían poliedros apilados —cubos u octaedros, por ejemplo—, donde los vértices definen las posiciones de los átomos y las aristas corresponden a los enlaces químicos. Cuando esta figuración se estira, cada enlace responde alargándose una parte proporcional de esta extensión. El enlace se rompe cuando la separación alcanza cierto punto crítico; si se rompen una cantidad suficiente de enlaces el sólido se agrieta.

El estudio de los fallos de los materiales hubo de hacer frente a un problema madrugador. Los investigadores descubrieron que incluso los materiales más fuertes se rompían con tensiones diez veces menores que las necesarias para romper los enlaces químicos. A principios de los años veinte, A. A. Griffith mostró que la resistencia de un material no era consecuencia directa de la solidez de sus enlaces, sino que dependía de debilidades producidas por defectos en su estructura. Estos defectos, o fisuras, pueden ser microscópicos o visibles a simple vista, según la elaboración del material. Griffith se dio cuenta de que, al estirar un material de forma perpendicular, por encima y por debajo de una grieta, los enlaces del extremo de ésta sufren mayor elongación que los enlaces de otros sitios del defecto. Cuando un enlace se estira más allá de su punto de fisura, la tensión se concentra en los enlaces restantes, que se rompen a su vez.







2. LOS MATERIALES FRAGILES se rompen a lo largo de fisuras microscópicas. Cuando dos capas de átomos se separan en la vecindad del fallo, la tensión ejercida se concentra en la profundidad de la fisura. En el cristal, los enlaces químicos se rompen primero en el fondo de la grieta; ésta se abre entonces como una cremallera y las capas de átomos se separan a lo largo del plano de fractura. Si se producen varias fisuras a la vez, el vidrio se rompe en añicos.

Así, la grieta abre el material como si fuera una cremallera. Resultado: fractura por fragilidad.

Artesanos e ingenieros aprovechan las propiedades de fractura de los materiales para encauzar la formación de fisuras hacia lugares de conveniencia. Por ejemplo, la fuerza que se necesita para romper una hoja de cristal a lo largo de un surco abierto con un diamante es mucho menor que si la lámina está impoluta. Los enlaces del fondo del surco concentran mucha tensión cuando se estiran y se rompen antes que cualquier otra parte de la estructura.

En cambio, el cobre y otros materiales dúctiles no se rompen a lo largo de una hendidura somera. James R. Rice y Robert G. Thompson sugirieron en 1973 que la misma fuerza que amplía la grieta de un material quebradizo debe debilitar las fisuras en un material dúctil. En su opinión, los enlaces se rompen primero entre planos inclinados con respecto al plano de fisura, pero no forman nuevos defectos. Antes bien, las capas inclinadas de átomos se deslizan entre sí para aliviar la tensión, enlazando nuevos pares de átomos durante este proceso. La eficacia del mecanismo de deslizamiento depende de la facilidad con que se hacen y deshacen enlaces a lo largo de este plano.

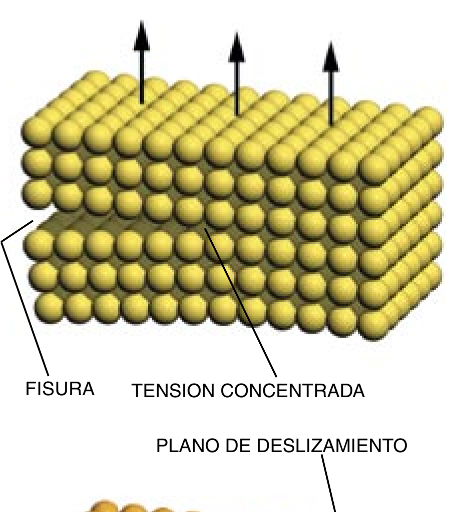
Los materiales muestran, pues, un comportamiento frágil o dúctil según la celeridad de ruptura de los enlaces comparada con la velocidad de formación de nuevos enlaces. Mediante el microscopio electrónico, los metalúrgicos determinaban qué planos se fracturaban y cuáles deslizaban. Pero la razón precisa por la que un material no se comportaba igual que otro seguía escondida en el misterio de los enlaces químicos, que resultaron ser más complicados de lo imaginado en un comienzo.

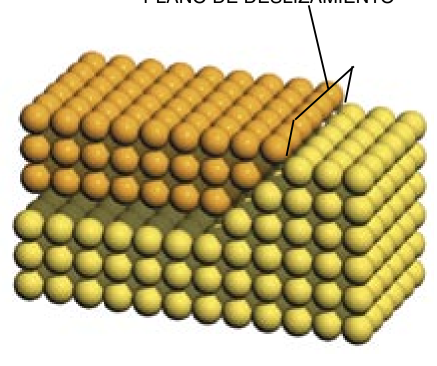
La representación habitual del enlace químico —una varilla que pone en conexión átomos adyacentes— describe con bastante exactitud numerosas notas de las moléculas, pero no aporta una explicación adecuada de la ruptura y deformación de los materiales. Aunque fuera posible permanecer sobre la agrupación de protones y neutrones de un núcleo atómico, no podríamos caminar por un puente hasta un átomo vecino. En realidad, las propiedades de los enlaces químicos están determinadas por variaciones de densidad en la estructura electromagnética del material.

La carga eléctrica es más densa en el núcleo, donde se encuentran los protones dotados de carga positiva. Fuera del núcleo sólo existe una nube de carga negativa generada por los electrones. Esta nube suele ser más densa en la dirección del núcleo más cercano, donde se solapan los electrones que pertenecen a ambos átomos. En 1926, los físicos descubrieron las leyes de la mecánica cuántica que describen la distribución de cargas en átomos y moléculas, pero la resolución de las ecuaciones para un gran número de átomos requiere el uso de ordenadores muy potentes.

MARK E. EBERHART es profesor de química y geoquímica en la Escuela de Minas de la Universidad de Colorado, cuyo centro de ingeniería, computación y simulación de materiales dirige.







3. LOS MATERIALES DUCTILES se deforman a lo largo de planos inclinados con respecto a las fisuras microscópicas. Los átomos se deslizan entre sí a través de este plano inclinado y alivian la tensión ejercida sobre los enlaces de la fisura. De esta manera, un golpe en el extremo de la fisura absorbe enormes cantidades de energía, haciendo que los metales dúctiles sean más seguros que los quebradizos y se utilicen en objetos que deben resistir colisiones.

Sólo a finales de los años setenta se dispuso de suficiente capacidad de cálculo para realizar exploraciones teóricas rudimentarias de la relación entre la estructura electrónica de un cuerpo y su fractura. En los años noventa se dispuso de ordenadores más rápidos y los físicos pudieron aprovechar los algoritmos más refinados que requiere la simulación de roturas y deformaciones. Estos avances sirvieron de ayuda inestimable para Gregory B. Olson y demás adscritos al grupo de investigación sobre el acero de la Universidad del Noroeste. Olson organizó el equipo en 1985 con objeto de construir las herramientas necesarias para el diseño por ordenador de aceros superreforzados.

El grupo de Olson ideó un método para determinar las diferencias en la densidad de carga de materiales similares mediante programas informáticos creados por Arthur J. Freeman. Calcularon la densidad de carga de una aleación "virtual", primero cuando dos planos de átomos se separan y luego cuando uno desliza encima del otro. Apoyados en la densidad de carga, determinaban la energía exigida para provocar la fractura o el deslizamiento. A continuación, modificaron la composición de la aleación virtual y volvieron a realizar los cálculos. Mediante la comparación entre las energías de uno y otro material, el grupo determinaba si la aleación era dúctil o quebradiza. Las diferencias de energía que encontraron entre las aleaciones virtuales guardan pleno acuerdo con los fallos característicos de aleaciones reales, medidos en laboratorio.

Los cálculos de Olson y Freeman mostraron que se podían recrear las fracturas y los deslizamientos en el ordenador de forma realista, pero esta capacidad todavía no permitía *predecir* qué cambios se tenían que hacer en la química de la aleación para producir comportamientos dúctiles o quebradizos. Yo deseaba desarrollar una teoría de este tipo. En particular, quería predecir qué elementos debían agregarse a una estructura química para conseguir los cambios deseados. La experiencia nos había enseñado que sólo ciertos elementos funcionarían, pero ¿cuáles eran? Responder a esta cuestión implicó un cambio revolucionario en la representación de los enlaces químicos en un cuerpo.

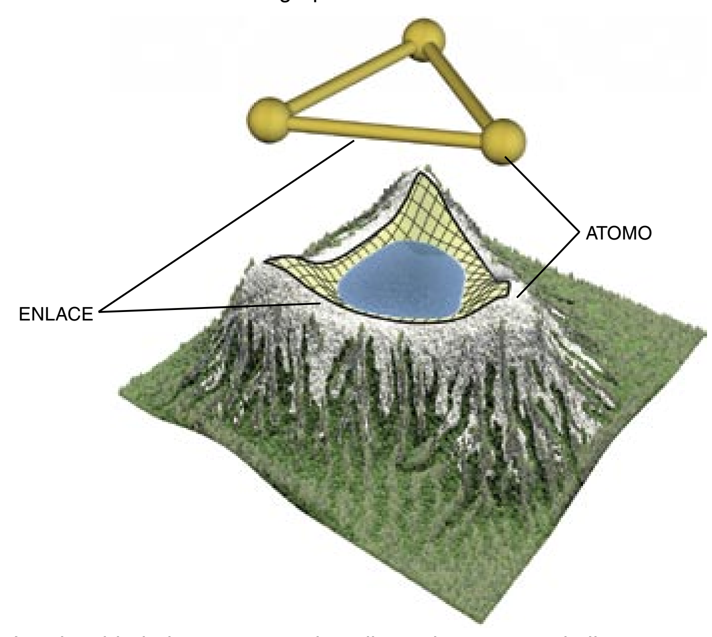
Conexiones profundas

Una teoría con capacidad predictiva de los fallos intrínsecos de los materiales sería utilísima para quienes se dedican a proyectar nuevas aleaciones. Por ejemplo, el aluminiuro de níquel se podría utilizar en construcciones aeronáuticas por su ligereza y resistencia; ésta, a diferencia de lo que ocurre en otros metales, aumenta con el calor. El problema es que, como suele suceder en las aleaciones de alta temperatura, el aluminiuro de níquel es demasiado quebradizo para aplicarlo a la fabricación de motores a reacción. Tenía que dar con la manera de predecir qué átomos de la estructura del material debían reemplazarse para volverlo más dúctil.

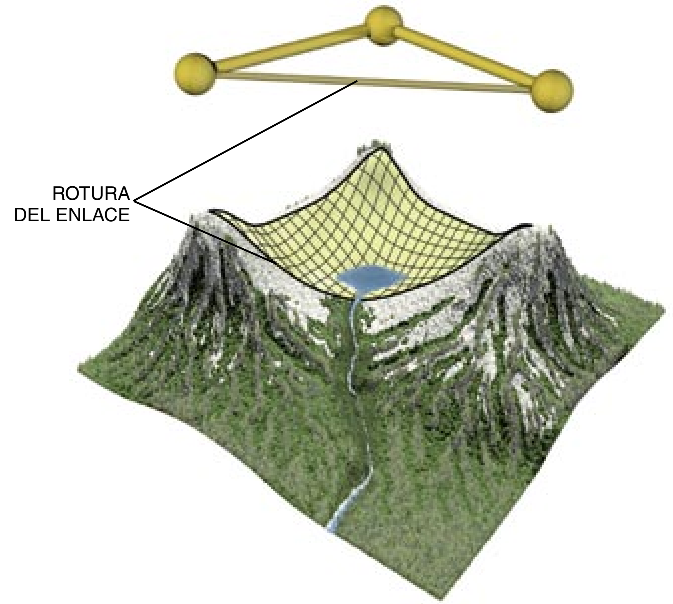
Los modelos clásicos describen los enlaces químicos en función de la cantidad de carga electrónica que hay entre los átomos, pero esta visión es poco realista. Conforme los átomos se van separando, la carga disminuye sin llegar a desaparecer por completo. La conexión del enlace nunca se

Una nueva perspectiva de los enlaces químicos

El modelo clásico representa los enlaces químicos mediante varillas que conectan átomos. No sirve para describir por qué se rompen las cosas. En realidad, las varillas simbolizan nubes de carga electrónica, que pierden densidad cuando los átomos se separan. Como esta carga nunca desaparece, no existe ninguna indicación de que ha ocurrido una fractura. Para encontrar qué desaparece cuando los enlaces se rompen, hemos de fijarnos en la topología de la densidad de carga, que describe las conexiones dentro de grupos de átomos.



La densidad de carga en dos dimensiones se asimila a un mapa de montaña. Los picos representan las concentraciones máximas de densidad de carga, que corresponden al núcleo de los átomos; una cuenca da idea de una zona de baja densidad de carga, y las aristas que unen dos picos designan enlaces químicos. La topología de la densidad de carga equivale a la presentación tradicional de la estructura molecular porque sus componentes se corresponden uno a uno.



Cuando se estira un material los átomos se separan y la carga a lo largo del enlace disminuye. El enlace se rompe —y deja de existir como conexión topológica entre átomos— cuando el punto menos elevado de la cresta pasa bajo el nivel del fondo de la cuenca. *—M.E.E.*

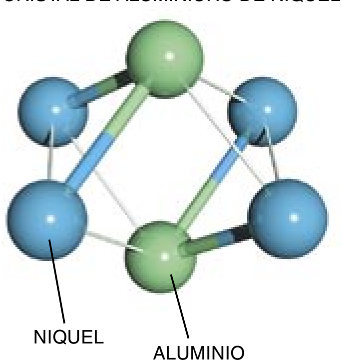
rompe; no hay fracturas. Se requiere otra característica de la densidad de carga que represente mejor el enlace y su rotura. Richard F. W. Bader la descubrió: la topología, rama de la matemática que estudia las propiedades que permanecen invariantes en un objeto cuando éste se estira o se aplasta.

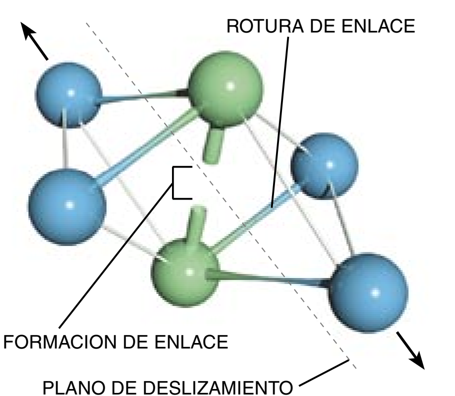
La topología original de un cuerpo se destruye cuando se hacen cortes o combinaciones de formas. Desde una óptica topológica, una taza de té y una rosquilla son idénticas: se puede transformar una rosquilla de arcilla en una taza de té sin cortarla utilizando el agujero para formar el asa. En cambio, una bola de arcilla no se puede moldear en forma de rosquilla o taza de té sin agujerearla ni separar partes que habían estado previamente conectadas.

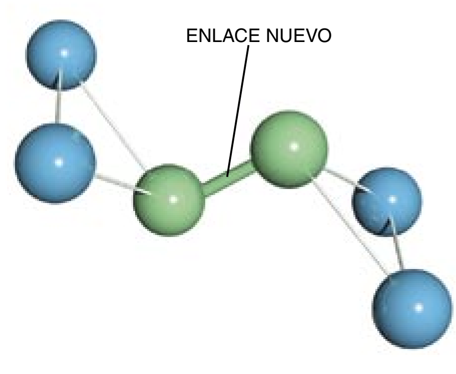
Bader aplicó sus ideas revolucionarias sobre los enlaces químicos al análisis de moléculas orgánicas. Comprobé que sus observaciones ofrecían un medio excelente para abordar los sólidos metálicos. Las fracturas son procesos que cambian la naturaleza de las conexiones en el interior de un objeto, de forma que tenía sentido describirlas topológicamente. Pero tuve que demostrar en un sólido, tal como hizo Bader para las moléculas, la vinculación entre la representación topológica y la representación clásica de los enlaces químicos.

Para explicar bien la naturaleza de una conexión topológica entre átomos, se compara la densidad de carga con el mapa de una cadena montañosa. En esta imagen la altura corresponde a la densidad de carga: los picos designan las zonas con carga máxima y las cuencas corresponden a los lugares con menor carga. Dos átomos están conectados topológicamente si hay una línea de cresta de densidad de carga entre sus picos. Estos perfiles o crestas equivalen a las varillas que, en la representación clásica, simbolizan los enlaces químicos entre átomos.

Durante cuatro años efectué cálculos sobre metales y aleaciones simples para mostrar que la perspectiva topológica del enlace ponía en conexión los mismos átomos que la representación tradicional. La topología nos dice que no tenemos que examinar toda la densidad de carga para cartografiar el terreno: importan cumbres, cuencas y desfiladeros. Si se conoce la posición de estos puntos críticos, se puede interpolar el terreno que las separa. En particular, si se conocen las posiciones de dos picos y de







4. LA TOPOLOGIA DE LA DENSIDAD DE CARGAS revela exactamente dónde y cuándo se rompen y se crean los enlaces a medida que un sólido se deforma, algo que los modelos tradicionales nunca explicaron del todo. Nadie sabía con seguridad, por ejemplo, que se forma un enlace entre dos átomos de aluminio cuando se estira un cristal de aluminiuro de níquel a lo largo de un plano de deslizamiento. La carga necesaria para formar este enlace procede de la rotura de los enlaces entre los átomos de aluminio y níquel. La manipulación de esta transferencia de cargas encierra la clave para fabricar aleaciones más dúctiles.

un desfiladero entre ellos, se puede asumir sin riesgo a equivocarse que hay una línea de cresta —un enlace químico— que va de un pico al otro a través del paso.

Demostrar la validez de la perspectiva topológica de los enlaces químicos en un sólido fue tarea sencilla. Pero sólo me indicaba qué átomos estaban conectados. Ignoraba si era o no fácil romper los enlaces. Responder a esta cuestión exigía examinar la morfología del terreno en las proximidades de los puntos críticos; tal morfología se caracteriza mediante las curvaturas principales en cada punto, números que especifican la curvatura según la dirección en que la altura cambia más deprisa y según la dirección perpendicular.

La curvatura principal es negativa cuando la altura decrece, como sucede en los picos. A la inversa, las curvaturas positivas ocurren allí donde la altura aumenta. En un desfiladero entre dos montañas —el centro de la línea de cresta que representa un enlace— la altura aumenta rápidamente en la dirección de los picos cercanos y decrece en la dirección perpendicular. El desfiladero tiene una curvatura principal negativa y la otra curvatura principal positiva. Es un punto en silla de montar.

Para una descripción completa la densidad de carga se amplía la representación a las tres dimensiones del espacio, donde cada punto crítico tiene tres curvaturas principales. En este caso, un enlace tridimensional está definido por un punto de silla de montar con dos curvaturas principales negativas y otra positiva.

Las primeras predicciones

¿Cómo exponer la ruptura de un enlace topológico? La primera interpretación llegó al asociar los enlaces con una característica definida de la densidad de carga. Cuando dos átomos enlazados en un cuerpo se separan, cambian las curvaturas a lo largo del eje del enlace y en las dos direcciones perpendiculares. En cuanto se anula la curvatura a lo largo de una de estas direcciones, o de las dos, desaparece también la conexión topológica entre los átomos. La clave estriba en que los enlaces no se rompen cuando desaparece la densidad de carga entre los átomos, sino cuando los dos átomos pierden su conexión topológica.

La descripción topológica del enlace, junto con la magnitud de las curvaturas principales implicadas, nos permiten realizar un análisis más cuantitativo de la fractura. Consideremos un punto de silla bidimensional, sirviéndonos de la imagen de la cadena montañosa. Si nos situamos en el desfiladero entre dos montañas, podemos caminar en cuatro direcciones distintas —dos de ellas hacia los picos respectivos— sin que cambie la altura (ni, por tanto, la densidad de carga). Si cuatro personas se colocan en el paso y toman respectivamente cada una de estas direcciones, sus trayectorias dibujarán una X. El plano que contenga estas trayectorias en aspa definirá un ángulo agudo con la pendiente escarpada que desciende hacia el lago situado en la cuenca inferior, que simboliza la zona con menor densidad de carga. Este ángulo depende de la razón entre las dos curvaturas principales.

Si los dos picos (o átomos) se separan el enlace pierde carga, como si se barrenara el desfiladero para rebajarlo. El valor del ángulo inicial, previo a la separación, informa de cuánta tierra puede removerse; el ángulo disminuye a medida que la excavación avanza. Cuando este ángulo se aproxima a cero, la altura del desfiladero se hace menor que el nivel del lago y éste empieza a vaciarse. Cuando el ángulo es igual a cero, y el desfiladero desaparece, el enlace se rompe. Para entonces, el paso alcanza la misma profundidad que el punto más bajo de la cuenca, drenando la última gota de agua.

De forma similar, podría formarse un enlace mediante la adición de cargas. Este proceso de construcción de enlaces sería similar a acarrear tierra del paso excavado para formar un dique —o línea de cresta— en el centro del lago. En resumen, se rompe el enlace cuando se elimina carga del área que ciñe a un punto de silla de montar; se forma un enlace cuando se añade carga cerca de un mínimo.

La analogía del desfiladero deviene más complicada cuando se recurre a ella para describir la densidad de carga en tres dimensiones. Hay que sustituir por formas geométricas los ángulos que se utilizan. En vez de un plano que contiene las cuatro direcciones, donde podríamos pasearnos sin ganar ni perder altura, hemos de representar una forma que contendría todas las direcciones en las que la densidad de carga fuera equivalente.

Roturas peligrosas

Cuando se trata de la seguridad de estructuras complejas —los aviones, por ejemplo— un fallo repentino se convierte en una tragedia. Lo saben por experiencia los pasajeros y tripulación del infausto vuelo 243 de las líneas aéreas Aloha. El 28 de abril de 1988, veinte minutos después del despegue, se abrieron varias fisuras en los remaches que unían las planchas del fuselaje del avión. El aire del interior del avión, que tenía mayor presión que el de fuera, hizo saltar una sección de seis metros del fuselaje, provocando que 90 pasajeros tuvieran que realizar un aterrizaje de emergencia en lo que entonces era un avión descapotable. La explosión lanzó una azafata fuera del avión; fue la única víctima.

Si se hubieran realizado inspecciones concienzudas del avión antes del accidente se habría descubierto que las fisuras microscópicas a lo largo de los remaches habían ido creciendo durante sus 19 años de servicio y habían ensanchado las junturas metálicas. En su último vuelo, las fracturas alcanzaron una longitud crítica y se abrieron del todo. Sin embargo, hasta el momento de la catástrofe, la fatiga del material sólo se había manifestado a lo largo de estas fracturas, tal como pretendían sus ingenieros. Esta deformación dúctil crece lentamente aliviando la tensión en el metal y aflojando los extremos de las fracturas, y proporciona una oportunidad inmejorable de ver signos de fatiga antes de que algo se rompa en pedazos.

La exigencia de seguridad guía a los ingenieros de materiales en su búsqueda de ductilidad a agregar en metales que son lo bastante rígidos para mantener su forma bajo tensiones como las producidas por los cambios de presión que experimenta un avión en vuelo. Para hacer un material más dúctil se añaden los elementos adecuados en la aleación base, lo que durante centenares de años ha consistido en un arduo proceso de prueba y error. Es muy reciente el descubrimiento del método para prever qué elementos cumplen mejor con este trabajo.

Los metalúrgicos han desarrollado un segundo método para hacer que un material frágil se vuelva menos propenso al fallo catastrófico: el control de la estructura microscópica, disponiendo uno a uno los cristales microscópicos como si empaquetaran piezas de porcelana. Por ejemplo, pueden envolver cristales de un material quebradizo con capas de otro intrínsecamente dúctil, como el cobre. De la misma manera que se envuelven vajillas con espuma para protegerlas de las tensiones, cualquier fractura en un cristal metálico frágil se extenderá tan sólo hasta la frontera con el dúctil cobre. Cuando se escoge la mejor aleación base, sólo hace falta este diseño microestructural para hacer a la aleación lo bastante dúctil y segura, o por lo menos, para que ofrezca señales de aviso antes de que ocurra la catástrofe.

—M.E.E.



LOS PASAJEROS LUCHAN por salir de la cabina descubierta en el vuelo 243 de las Aerolíneas Aloha.

Si se toma la X formada por las dos direcciones bidimensionales de igual densidad de carga y la hacemos girar alrededor del eje correspondiente al enlace químico, se obtienen dos conos unidos por el vértice. Los conos forman un ángulo agudo con un plano perpendicular al enlace, que atraviesa el punto de unión de ambos conos. Estamos describiendo el ángulo que mide la cantidad de carga que debe perderse en el punto de silla de montar para que se rompa el enlace. A medida que el ángulo se hace más pequeño, las bases del cono se acercan y terminan por dibujar un disco. Como sucedía en el ejemplo bidimensional, cuanto mayor sea el ángulo de partida tanto más carga hay que eliminar para reducir el ángulo a cero y romper el enlace.

El reverso de la ruptura de un enlace es la formación de un enlace. Necesitamos entender los dos procesos para explicar un fallo. Si un cono nos sirve para ilustrar un enlace, habrán de valernos otras formas geométricas para representar otros puntos críticos. Los mínimos, que pueden convertirse en enlaces si se añade carga suficiente en sus alrededores, se comparan con elipsoides. En estos casos se necesitan dos ángulos para especificar la forma y medir la cantidad de carga —o tierra— que se debe transferir desde un punto de silla de montar para crear un enlace. Los ángulos también nos dicen en qué dirección es más sencillo construir un dique en el lago.

Con esta representación geométrica de todos los puntos críticos del sólido, nos es dado determinar con exactitud dónde y cuándo cambia la densidad de carga durante la formación y rotura de enlaces. Que un material ceda por fractura frágil o por deformación dúctil, dependerá del tipo de proceso predominante, lo que implica que debemos privilegiar uno frente al otro. Así razoné cuando hube de explicar el fallo característico del aluminiuro de níquel y dos aleaciones próximas, a saber, los aluminiuros de hierro y cobalto.

Estos tres compuestos tienen estructuras idénticas y, por tanto, proporcionan un banco de pruebas ideal para el nuevo enfoque de los fallos de los materiales. Me proponía aclarar las diferentes propiedades de las tres aleaciones —dejadas de lado en los modelos tradicionales— y sugerir qué elementos había que añadir al aluminiuro de níquel para hacerlo más dúctil. Esto significaba alargar al máximo la vida de los enlaces originales y estimular la formación de nuevos enlaces a lo largo del plano de deslizamiento, tan pronto como fuera posible. Semejante transacción implicaba destinar carga de los enlaces rotos a la formación de nuevos enlaces. Para determinar en qué casos esto era posible necesitaba nuevos programas informáticos que generaran los cálculos necesarios para cartografiar la densidad de carga y evaluar los cambios de su topología.

James M. McLaren, de la Universidad de Tulane, desarrolló las herramientas que yo precisaba para calcular la densidad de carga de los tres aluminiuros y, más importante aún, para identificar los puntos críticos y los ángulos que los describen. Las simulaciones informáticas concordaban con las propiedades de rotura y deformación experimentales de estos metales. Del aluminiuro de

por ciento de níquel por hierro producía el efecto predicho.



hierro se sabía que era la más dúctil de las tres aleaciones; las simulaciones revelaron que tenía la carga más intensa en torno al punto de silla de montar, en los enlaces entre los átomos de hierro y aluminio. Este aluminiuro mostraba también el mínimo más plano entre átomos de aluminio adyacentes; sólo se requería una carga muy pequeña para formar un enlace entre ellos.

La sugerencia de que se podían obtener las características de fallo de estas tres aleaciones a partir de la forma de su densidad de carga alrededor de dos únicos puntos me permitió dar el siguiente paso. Predije que podía alterar las propiedades de fallo del aluminiuro de níquel sustituyendo algunos átomos de níquel por un elemento porque dirigía más carga a lo largo del enlace entre el níquel y el aluminio. Así, esta carga estaría disponible para formar nuevos enlaces entre los átomos de aluminio del mínimo. Esta redistribución de las cargas mejoraría la forma de la densidad de carga hasta hacerla más parecida a la de un material dúctil.

Como la carga de cada elemento siempre tiene la misma forma en un entorno dado, no era difícil determinar que el hierro era el mejor sustituto del níquel. Volviendo a la analogía de la cadena montañosa, sabía que cada elemento determina una montaña con diferentes laderas que bajan de su cumbre. Una montaña de hierro cercana a otra de aluminio añade más roca al desfiladero y levanta una cuenca más plana que si la montaña es de níquel. Con el hierro se puede sacar bastante roca del enlace para construir una nueva línea de cresta entre los átomos de aluminio de la cuenca. En cambio, una montaña de cobalto no aporta roca suficiente al desfiladero para construir la línea de cresta.

Cuando se logró este resultado, se cumplían 15 años de búsqueda empírica de elementos de aleación para mejorar el aluminiuro de níquel. Era de esperar que otros hubieran descubierto que el hierro incrementaba la ductilidad. En una conferencia celebrada a finales de 1998 se ratificó que, de acuerdo con los ensayos experimentales, la sustitución del 10 por ciento de níquel por hierro producía el efecto predicho.

Predecir el futuro

Si bien mis predicciones llegaron demasiado tarde para tener un efecto real en el desarrollo de aleaciones de aluminiuro de níquel, hay razones para alegrarse. Una teoría que permitiera crear materiales con las características deseadas podría revolucionar —e incluso sustituir— a las investigaciones tradicionales basadas en el método de prueba y error.

Ya ha empezado la búsqueda de nuevas aleaciones más ligeras, más sólidas y capaces de retener sus propiedades a mayores temperaturas. Tales aleaciones mejoradas se podrán utilizar en aviones supersónicos e hipersónicos antes del año 2010. Pero el programa de desarrollo de esos materiales procederá de un modo distinto del seguido por el resto.

En vez de buscar a ciegas una aleación base con un conjunto ideal de propiedades características, los ingenieros de materiales utilizarán ordenadores para calcular la densidad de carga de un conjunto escogido de aleaciones base. A partir de esa información determinarán de qué manera se debe modificar la densidad de carga para producir las propiedades deseadas y prever qué elementos de aleación producirán estos cambios. Por primera vez se pergeñará una nueva aleación a partir de su estructura electrónica.

Si bautizaran el primer aeroplano fabricado con esta aleación rompiendo contra el morro una botella de champán me gustaría estar presente y examinar los cristales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ATOMS IN MOLECULES: A QUANTUM THEORY. Richard F. W. Bader. Oxford University Press, 1994.

COMPUTATIONAL METALLURGY. Mark Eberhart en *Science*, vol. 265, págs. 332-333; 15 de julio de 1994.

STUFF. Ivan Amato. BasicBooks, 1997.

THE VISUALIZATION AND USE OF ELECTRONIC STRUCTURE FOR METALLURGICAL APPLICATIONS. M. E. Eberhart y A. F. Giamei en *Materials Science and Engineering A: Structural Materials*, volumen 248, n.º 1, págs. 287-295; 1998.

Se puede consultar información adicional sobre estructura molecular en la página Web www.chemistry.mcmaster.ca/faculty/bader/

PERFILES

Gary Stix

EDWARD TELLER: Infamia y honor en el Café Atómico

Al salir hacia el aeropuerto John F. Kennedy, le dije a una colega que me ausentaba para entrevistar a Edward Teller. "¿Aún vive?", me preguntó asombrada. Un día después me encuentro frente a frente con un hombre de 91 años repantigado en un sillón, que ha dejado su bastón de madera labrada de metro y medio de largo apoyado contra una mesa encima de la que cuelga la Medalla Nacional de la Ciencia con la que le premió Ronald Reagan.

Con los ojos nublados por la ulceración, mira fijamente a la cara. Las que deben de haber sido las cejas más pobladas del mundo se han vuelto ralas. Una bota campera cubre la prótesis que sustituyó al pie que perdiera en un accidente de tráfico, allá por 1928. Su secretaria me informa de que su memoria de los sucesos recientes se ha debilitado a raíz de un ictus. Me pregunto incluso si alcanza a verme o si será capaz de mantener la entrevista.

Al poco de sentarme, inicia el diálogo con voz lenta, fuerte y de bien entonada cadencia. "He sido controvertido en algunos aspectos. Quiero saber lo que conoce usted de la controversia y lo que piensa sobre ella." Rebusco mi grabadora, pero me detiene con un gesto. Mi azorada e ininteligible respuesta sólo sirve para que me espete: "¿Qué piensa usted de Robert Oppenheimer?", refiriéndose al científico que dirigía el Proyecto Manhattan, cuya credencial oficial de seguridad le fue retirada a raíz de la testimonial de Teller. "Claramente existían diferencias entre Oppenheimer y yo. ¿Qué sabe usted de esta controversia, y qué piensa de ella?"

Quizá sea la revancha por los tres artículos que *Scientific American* publicó en 1950 en los que se expresaba una fuerte oposición al desarrollo de la bomba de hidrógeno, arma cuyo inflexible promotor fue Teller cuando muchos otros físicos atómicos estaban en contra. Teller me pide entonces que le enseñe lo que escriba antes de que se publique. Yo me niego. "Se dará usted cuenta de que ahora estoy tentado de cancelar la entrevista, y lo más que puedo hacer es concedérsela con extrema cautela, para asegurarme de que no haya malentendidos."

El nonagenario de cuyas facultades dudaba hace unos momentos me ha puesto contra las cuerdas. Acabo de experimentar en carne propia el coraje y la resolución que se impusieron a presidentes, generales y miembros del Congreso. Ahora que lleva ventaja en nuestro encuentro, Teller parece dispuesto a cejar en su interrogatorio.

Lo ocurrido en las pocas horas siguientes fue como volver a ver una vieja película. Gran parte de la trama del guión resulta familiar, pero el efecto de su declamación no hace sino crecer conforme se repite. "¿Qué hubiera ocurrido —le pregunto— si no hubiéramos fabricado la bomba de hidrógeno?" Y repone: "Usted me estaría entrevistando en ruso, aunque para ser exactos no me entrevistaría usted. Yo no estaría vivo. Hubiera muerto en un campo de concentración." A propósito del veto a los ensayos nucleares, se manifiesta con idéntica contundencia: "El espíritu de acabar con los ensayos es el espíritu de la ignorancia; estoy contento de haberlo violado. Creo que no lo violamos lo suficiente."

El personaje de Teller —esa mezcla de científico y político halcón— está enraizado en las tensiones que sacudieron Europa durante la primera mitad del siglo, particularmente en la toma de Hungría por los comunistas en 1919. "Mi padre era abogado; su despacho fue ocupado, cerrado y tomado por los rojos. Pero lo siguiente fue un régimen fascista antisemita, y yo estaba al menos tan opuesto a los fascistas como a los comunistas."

Para comprender a Teller, se debe recordar que ocupa una puesto de honor en el Café Atómico: estuvo presente en muchos de los principales acontecimientos de la física nuclear del siglo XX.

Intervino en el Proyecto Manhattan para fabricar la bomba atómica y se convirtió en paladín infatigable y colaborador científico en la construcción de otra bomba que liberaría cantidades inimaginables de energía en la fusión nuclear. En 1952 Teller dio un paso más y ayudó a organizar la financiación de un segundo laboratorio de producción de armas, el Lawrence de Livermore, que competiría con el de Los Alamos. En Livermore se consiguió reducir el tamaño de las cabezas atómicas de ma-



1. Edward Teller no alberga remordimientos sobre su controvertida trayectoria

nera que cupiesen en los submarinos nucleares.

Teller concibió una multitud de usos para las explosiones nucleares, desde la minería hasta la alteración del tiempo atmosférico. Se erigió en defensor incansable de la energía nuclear. Se alió con el gobernador Nelson Rockefeller en los años sesenta para emprender programas de construcción de refugios nucleares. Fue uno de los más fervientes en persuadir a Ronald Reagan y a George Bush para que promovieran los programas de defensa contra misiles empleando técnicas aún inconclusas, como el láser de rayos X. No hace mucho proponía desviar los cometas y asteroides que nos amenacen mediante explosiones nucleares.

Me interesa conocer su opinión del legado que deja. Le pregunto cómo le gustaría que le recordaran. "Se lo contaré con todo detalle", replica. "Me da lo mismo cómo me recuerden." ¿No guarda ningún remordimiento el padre de la bomba de hidrógeno y el adalid de la "Guerra de las Galaxias"? "¿Hay algo que usted crea que quizá no se debió hacer?", le pregunto. Tras 15 segundos de silencio llega la respuesta: "En conjunto, no." Le interrogo sobre si todavía cree que el Proyecto Chariot, el plan para crear un puerto en Alaska que nunca llegó a realizarse, consistente en una voladura con seis bombas de hidrógeno, era una buena idea. "Mire", replica con un énfasis pedante, "con un buen puerto, el norte de Alaska se hubiera integrado mucho más eficazmente en la economía norteamericana, como ocurrió con Hawai."

Teller es también implacable en lo que se refiere a su contribución a la concepción de la bomba de hidrógeno. La mayoría de los relatos atribuyen a Stanislaw Ulam la intuición clave que posibilitaba una explosión termonuclear, una idea que surgió sólo después de que Teller hubiese tentado otro enfoque para lo que se denominaba "la Superclásica" que no llevó a ningún lado. Ulam propuso que la onda de choque mecánica de una bomba atómica podría comprimir el combustible de hidrógeno y desencadenar una reacción de fusión. Teller depuró la idea de Ulam y apeló a la radiación de la explosión inicial —en vez de la fuerza mecánica— para alcanzar la compresión necesaria.

Así que le pregunto quién reclama para sí la paternidad del arma definitiva de destrucción en masa, cuya ignición se conoce como el mecanismo de Ulam-Teller. Una vez más, Teller no se muerde la lengua: "Yo contribuí, Ulam no. Siento tener que contestar de manera tan ruda. Ulam estaba descontento, con razón, de un viejo enfoque. Me vino a ver con parte de un modelo que yo había desbrozado y sobre la cual me resultaba difícil atraer la atención de la gente. Estaba él entonces dispuesto a firmar un artículo. Pero cuando luego llegó el momento de defender ese artículo y de echar toda la carne en el asador, se echó atrás. 'No tengo fe en eso', me dijo." Le objeto que la mayoría de los informes relatan que Ulam sugirió emplear la compresión para iniciar la reacción de fusión. "Lo sé, y es mentira", ataja.

Pese a este muy suyo ponerse el mundo por montera, reconoce la confusión que sufrió al verse rechazado entre sus colegas por testificar contra Oppenheimer. En 1954 la Comisión de Energía Atómica estaba investigando si su adscripción filocomunista le indujo a Oppenheimer a obstaculizar el trabajo sobre la bomba de hidrógeno. La intervención de Teller contribuyó a que Oppenheimer perdiera su credencial de seguridad y su puesto de asesor en la comisión. "Es muy doloroso", es la concisa respuesta que recibo cuando le pregunto cómo se siente hoy ante tal aislamiento.



2. Derogar la prohibición de ensayos, tal era el mensaje de Teller a una comisión del Senado en 1963

Tampoco le gustan las inevitables asociaciones que se crean en la mente del público entre él y el sabio malvado de la ficción. "No me llamo Strangelove. No sé quién es Strangelove", estalla. "No me interesa Strangelove. ¿Qué más puedo decir?" Momentos después, como porfío en la cuestión, me advierte: "Vamos a ver. Si repite otras tres veces ese nombre, le echo del despacho."

Con todo, Teller retiene una aguda percepción de lo que los otros ven en él. Hace tres años, tras haber sufrido un ictus, una enfermera le interpeló para discernir si estaba lúcido: "¿Es usted el famoso Edward Teller?" "No —le corrigió—, soy el infame Edward Teller."

Me despido. Mientras doy un paseo por las calles de Palo Alto no puedo apartar de mi mente cuánto ha influido la determinación de este hombre en la humanidad de la segunda mitad del siglo. Mi propio entorno familiar. Veo a mi padre y mi abuelo, sentados a la mesa del comedor, ponderando los materiales necesarios para construir un refugio antiatómico en el sótano que pudiera detener los letales rayos gamma de una explosión nuclear que alcanzara Nueva York, enfrascados ambos en la histérica vorágine que Teller contribuyó a alimentar. Me pregunto si no tendría razón Isidor I. Rabi, premio Nobel de física, cuando decía que "el mundo hubiera sido mejor sin Teller".

Camino por la Avenida de la Universidad, junto a veinteañeros con sus ordenadores portátiles, quién sabe si pensando en un negocio en Internet. Es obvio que el mundo maniqueo, de buenos y malos, en el que todavía vive Teller se ha diluido. Su despacho de la Institución Hoover se encuentra en el epicentro del recinto de Stanford, donde se incubó la era posnuclear de las industrias electrónicas y de la biotecnología. Los soviéticos nunca podrían competir con el arsenal electrónico americano, y mucho menos con la vibrante economía del norte de California que produjo los ordenadores Macintosh y los procesadores Pentium. Hasta Fidel Castro cavila anhelante cómo convertir Cuba en una potencia de la biotecnología. En último extremo, los microprocesadores y el ADN recombinante —dos sillares de la economía del bienestar— ayudaron a acabar con la guerra fría de una manera que ni el más fantasioso de los láseres de rayos X de la Guerra de las Galaxias hubiera podido.

Pero Teller no está acabado. A su edad, renuncia a dar tregua a sus grandiosas visiones de salvación a través de la técnica. Junto con otros colegas ha enviado un artículo a *Nature* en el que sugiere dispersar dióxido de azufre u otras partículas submicrométricas en la estratosfera para obstruir la luz del sol y detener el calentamiento global, una opción más barata, asegura, que reducir las emisiones de dióxido de carbono.

Ciencia y sociedad

Venido del fondo marino

Epidemias oceánicas

Diciembre de 1992. Bangladesh. Miles de personas de la costa meridional sufren vómitos intempestivos acompañados de diarreas; por culpa de los tejidos deshidratados los ojos se hunden en las cuencas y se arruga la piel de la yema de los dedos. Muchos mueren a los pocos días.

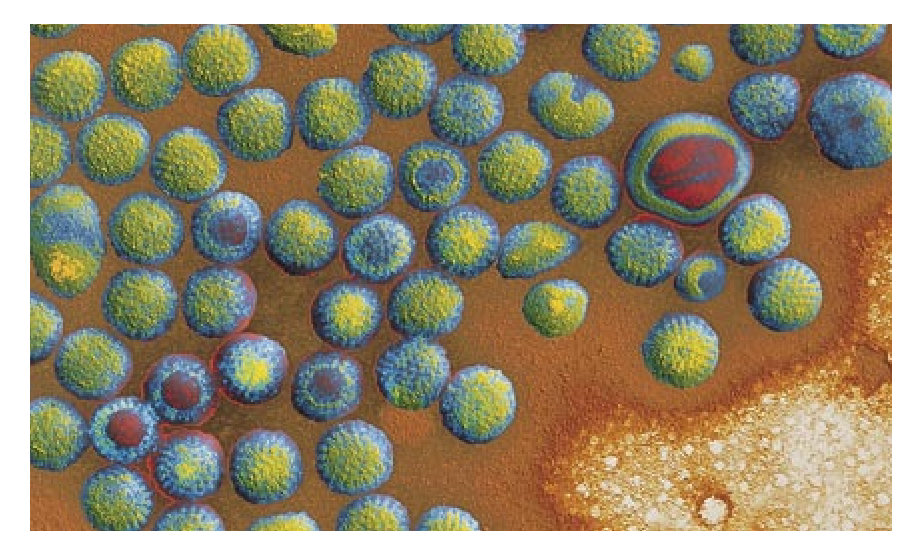
No se trataba de ninguna novedad. Esa tierra conoce muy bien el cólera, enfermedad infecciosa que halla en el agua un cómodo medio de transmisión. Pero en esta ocasión el brote epidémico coincidía con un afloramiento marino; el agua del fondo oceánico subió a la superficie inmediata a la línea de costa. Quizá nos encontramos ante un presagio de lo que le espera al mundo, si el hombre continúa vertiendo las aguas fecales, depuradas o no, al océano.

Crecen con los días las pruebas de patógenos, muchos exclusivos de heces humanas, en las profundidades oceánicas. Esa suerte de frigorífico, en expresión de Rita R. Colwell, instalado a miles de metros, podría devolvernos con los afloramientos lo que ha mantenido en estado latente y desencadenar una epidemia. De hecho se han detectado varios virus que infectan el tracto gastrointestinal —incluidos los poliovirus y los rotavirus— en muestras de agua oceánica tomadas a más de 1000 metros de profundidad.

Además, los microorganismos perduran. A finales de los años ochenta, Sagar M. Goyal aisló bacterias intestinales de muestras obtenidas de aguas de albañal, a más de 170 kilómetros de la costa neoyorquina, 30 meses después de la suspensión de los vertidos. Las bacterias, resistentes a varios antibióticos, demostraban que procedían de personas que habían tomado fármacos.

Paul R. Epstein, experto en salud pública de la Universidad de Harvard, tiene otra explicación de la epidemia sufrida en 1992 en Bangladesh. Un afloramiento pudo haber traído a la superficie nitrógeno y fósforo, nutrientes abundantes en aguas profundas. Ello favoreció una eclosión de plancton, que a su vez posibilitó la multiplicación en masa de copépodos, en cuyos intestinos prolifera a su vez el vubrión del cólera. La presencia de microorganismos patógenos en las profundidades constituye, además, una amenaza contra la estabilidad del ecosistema. Algunos son resistentes al cloro de las depuradoras.

CAROL EZZELL



Este rotavirus, patógeno humano, puede sobrevivir a grandes profundidades. Constituye una amenaza para la salud durante los episodios de afloramiento oceánicos

¿Qué es una onda?

Y otras cuestiones básicas

Los más presuponen que, por estar en el centro de todos los fenómenos que observamos, hay una definición uniforme de qué es una onda. Pero no es fácil definir este concepto básico

Pida a sus compañeros y alumnos que definan qué es una onda. Le sorprenderán, más de lo que imagina, las respuestas dadas. Hasta los que se dedican a los fenómenos ondulatorios propenden a la confusión y la vaguedad cuando se las ven con una pregunta de tamaña simplicidad aparente. Los estudiantes suelen caer en el pecado de circularidad: “una onda es una solución de la ecuación de ondas.” Pero, ¿qué es una ecuación de ondas? Lo más probable es que un profesional masculle algo acerca de la velocidad de propagación, como si el olor y el calor no se propagasen a alguna velocidad. Los matemáticos tienden a dar caracterizaciones formales basadas en la hiperbolicidad de ciertas ecuaciones diferenciales.

Así como una definición de ruido debe fundamentarse empíricamente, para definir una onda hay que ver qué ofrece la naturaleza. Una respuesta provisional podría ser la siguiente: una onda es un desequilibrio que se propaga. La noción de desequilibrio está presente también en un oscilador simple, en el que la energía cinética y la potencial se intercambian durante la oscilación. El principio de Hamilton (que un sistema dinámico toma una trayectoria que minimiza la integral en el tiempo de la diferencia entre las energías cinética y potencial) es una formalización de esta idea de intercambio entre dos formas de energía. No obstante, lo que hace que una onda difiera de un oscilador individual es que se propague ese desequilibrio. (Cierto es que dos ondas que viajan pueden formar una estacionaria, pero ignoremos esta complicación de momento.)

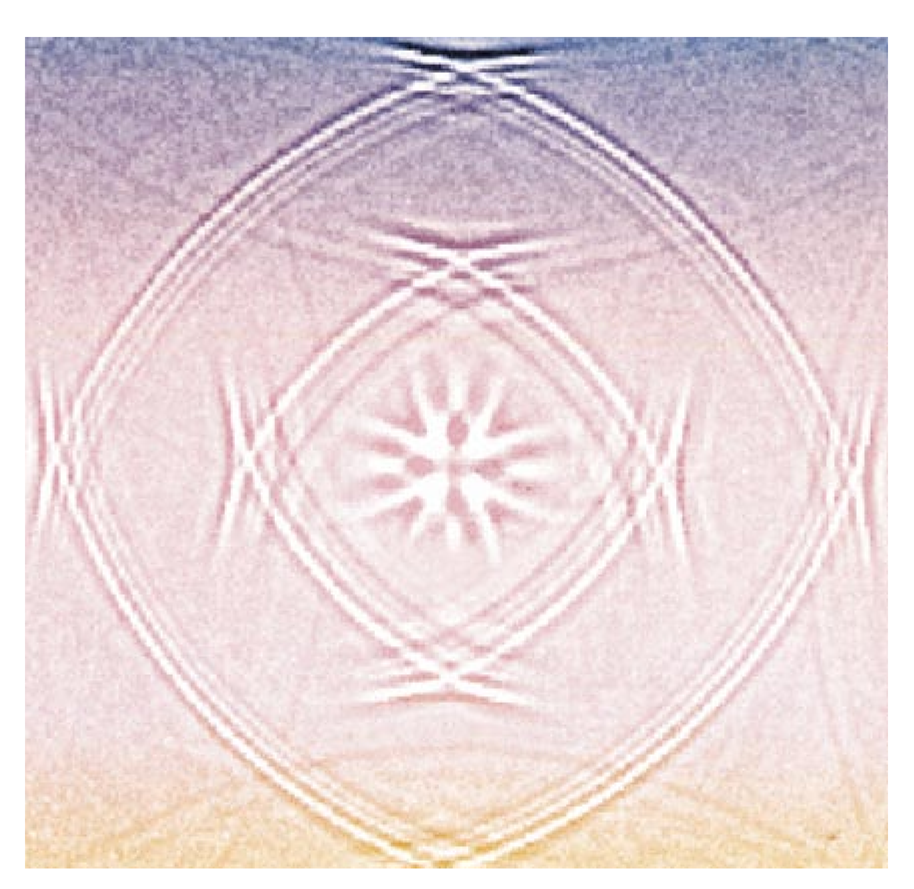
Equilibrios estables

En el más simple de los niveles, la ubicuidad de las ondas (clásicas)

puede atribuirse al amor de la naturaleza por los equilibrios estables. Sean las que sean las fuerzas (electromagnéticas o las gravitatorias, por ejemplo) que conecten unas partes de materia con otras, serán aproximadamente lineales para perturbaciones pequeñas en torno a un punto de equilibrio estable; una fuerza restauradora lineal supone que haya una oscilación armónica; los sistemas acoplados de osciladores dan lugar a perturbaciones tanto estacionarias como en propagación. La linealidad implica también superposición, así que podemos sumar como es debido soluciones periódicas y obtener "paquetes" de ondas finitos. De esta forma, para perturbaciones pequeñas alrededor de un estado de equilibrio de sistemas acoplados o extensos las ondas son la consecuencia natural de la estabilidad del movimiento armónico simple.

El milagro de las ondas que vemos es la organización que exhiben, pero hay ejemplos en los que esa organización se destruye. Una intensa dispersión produce un comportamiento difusivo en vez de una propagación ondulatoria. Los dispersores destruyen el nivel de organización de la onda incidente y en última instancia conducen a un comportamiento difusivo (no ondulatorio). De manera similar, cuando una ola rompe en una playa los términos advectivos de la ecuación de movimiento acoplan todas las escalas de longitud de la onda y se destruye la organización que vemos en el oleaje; la ola, por último, se disipa convertida en calor. A la vista de estos ejemplos, en los que una onda deja de serlo a causa de la destrucción de su grado de organización, nos vemos llevados a modificar nuestra definición de onda para que diga: una onda es un desequilibrio organizado que se propaga.

En múltiples ocasiones, describimos la propagación de una onda mediante una ecuación diferencial lineal. En la realidad es importante la no linealidad, capaz de destruir las ondas. Volvamos a las olas de las playas. Si se mira al mar desde una playa, se verá que a lo lejos su superficie tiene ondulaciones con un período de 5-10 segundos. A medida que se acercan a la playa sus alturas aumentan hasta que no pueden soportar más su propio peso y se rompen catastróficamente. La causa, matemáticamente hablando, es que los términos no lineales de la ecuación de movimiento van incrementando su importancia conforme crecen las olas. Cuando la no linealidad se torna determinante, el movimiento ondulatorio organizado se transforma en un movimiento turbulento. Es imposible decir exactamente en qué punto de este proceso la onda deja de ser onda.



El campo ondulatorio registrado que se ha propagado a través de un cristal homogéneo de silicio en tres momentos tras la excitación al otro lado del cristal. Este ejemplo muestra que los frentes de ondas en un medio homogéneo pueden ser cuadrados en vez de redondos. (Por cortesía de J. P. Wolfe.)

La no linealidad es a veces esencial para mantener la organización de una onda. En los solitones la expansión ondulatoria por dispersión se compensa exacta y milagrosamente con la inclinación no lineal de la onda; la onda solitaria mantiene así su identidad. De donde se desprende que la no linealidad conduce por igual a la creación y a la destrucción de organización.

El solitón más sencillo de producir es el salto hidráulico cilíndrico. Vaya a la cocina y abra el grifo del fregadero. Cuando el agua da en el fregadero su momento vertical se convierte en momento horizontal. En la mayoría de los casos, cuando el agua impacta en la superficie, viaja a una velocidad superior que la que llevan las ondas en la superficie del agua; en virtud de ello, las perturbaciones pierden capacidad para propagarse en forma de ondas superficiales, siendo arrastradas corriente abajo por el agua. Pero el agua ha de frenarse; llegará un momento en que su velocidad será ya sólo la de las ondas superficiales. Lo que sucede vale la pena reseñarlo. Se engendra un salto, un fenómeno de choque: el espesor del agua aumenta casi discontinuamente. Más allá, corriente abajo, la superficie del agua es barrida por ondas superficiales, ahora libres de propagarse. Pero el salto es estacionario, ¿por qué vamos a tener que considerarlo un fenómeno ondulatorio? Bueno, imagínese que va en un bote arrastrado corriente abajo por el agua. En su marco de referencia el salto hidráulico será una "onda" solitaria que cursa corriente arriba, de manera muy parecida al frente de una marea.

Difusión

Volviendo a la pregunta original, muchos aludirían a la contraposición entre comportamiento ondulatorio y comportamiento difusivo. En muchos fenómenos físicos no hay una

distinción clara entre estos dos comportamientos extremos. Tomemos por ejemplo la propagación de la luz en un medio turbio, en leche, digamos. La turbiedad es el resultado de la dispersión. (La sección eficaz de absorción de las moléculas de la grasa de la leche es mucho menor que la sección eficaz de la dispersión; en la tinta ocurre al revés.) Las ecuaciones que gobiernan el campo eléctrico son todavía las mismas ecuaciones ondulatorias lineales que se siguen de las ecuaciones de Maxwell. Pero lo que el ojo registra no es el campo eléctrico mismo, sino su intensidad. Como el campo que llega al ojo es la superposición de un número incontable de ondas dispersadas originadas en la leche (las ecuaciones son lineales), la intensidad real es la intensidad de esa superposición. Es fácil ver que esta intensidad total tiene en la superposición un término coherente y otro incoherente.

Si no hay interferencia constructiva entre las ondas dispersadas, la intensidad total será meramente la suma de las intensidades de cada onda individual. Si asociamos ahora estos términos de dispersión individuales, que no interfieren, a un número enorme de trayectorias brownianas no correlacionadas a través de la leche, a nadie sorprenderá que sin interferencia la intensidad satisfaga una ecuación de difusión (que es la ecuación de la distribución de probabilidad del movimiento browniano). El campo eléctrico satisface, pues, una ecuación ondulatoria, como dijo Maxwell, pero la magnitud que medimos (la intensidad) satisface una ecuación de difusión.

Algunos fenómenos son claramente difusivos, sin consecuencias ondulatorias. Por ejemplo, el calor. Todos "sabemos" que la conducción del calor está gobernada por la ecuación de difusión. Maxwell, en realidad, tenía sus dudas al respecto. La ecuación de difusión ordinaria no tiene en cuenta ninguna velocidad de propagación, luego no puede ser en verdad una descripción fundamental del transporte del calor; según esa ecuación, si se aplica una fuente de calor a un extremo de una barra, ¡en el otro la temperatura empieza a cambiar instantáneamente! Maxwell, que se basaba en la teoría cinética, introdujo un término balístico en las ecuaciones de conducción del calor. Obtuvo al final la ecuación del telégrafo (tiene derivadas primeras y segundas con respecto al tiempo), con su toma y daca entre el comportamiento difusivo (que sale de la derivada primera con respecto al tiempo) y el balístico (procedente de la derivada segunda con respecto al tiempo). Maxwell abandonó ese término balístico tras llegar a la conclusión de que "podía ser despreciado, ya que el ritmo de la conducción se establecerá rápidamente".

Esto concordaba con los experimentos de hace cien años, pero ahora ya no. En los años sesenta ya se observaron impulsos balísticos de calor a temperaturas bajas. La idea es que el calor es sólo la manifestación del movimiento macroscópico. El cálculo de las frecuencias resonantes clásicas de los átomos o de las moléculas en una red da números del orden de 10^{13} Hertz, es decir, caen en el infrarrojo; cuando las moléculas vibran desprenden calor. A estas vibraciones de la red se les llama fonones, que tienen propiedades ondulatorias y corpusculares. Las vibraciones de la red son responsables del transporte del calor, y sabemos que el calor es un fenómeno difusivo. Ahora bien, si la red se enfría cerca del cero absoluto, el camino medio libre de dispersión de los fonones pasa a ser comparable al tamaño macroscópico de la muestra. Cuando sucede esto las vibraciones de la red dejan de portarse difusivamente y son en realidad ondulatorias. Controlando la temperatura de una muestra es posible controlar la medida en que el calor es balístico (ondulatorio) o difusivo. En esencia, si se lanza un pulso de calor sobre esa muestra (mediante el paso de una corriente por un cable), los fonones, siempre y cuando atraviesen la muestra sin dispersarse, se propagarán como ondas. Cuanto más se dispersen, más difusivamente se portarán. Cuando el frío aprieta, se propagan ondas de calor como ondas.

Las ondas, de carácter escurridizo, son ubicuas en la naturaleza. Nuestros dos principales sentidos, la vista y el oído, dependen de las ondas. Los llamamos los sentidos "principales" porque aportan la información más precisa acerca del entorno. No faltan términos en el lenguaje ordinario para la pérdida de la vista o del oído; otra cosa es en el caso del gusto, el tacto o la percepción del calor. La mayor parte de lo que sabemos del mundo que nos rodea lo aprendemos de las ondas. Además, las neuronas funcionan por medio de la propagación de ondas eléctricas a través de los axones. Un ejemplo de pro es el disparo del corazón por medio de un impulso eléctrico que se propaga por el tejido cardiaco.

Hasta el espacio-tiempo se agita con ondas. Se las llama ondas gravitatorias y se propagan a la velocidad de la luz. Se está trabajando en observatorios con oportunidades reales de detectarlas. Esos instrumentos, interferómetros larguísimos, podrán medir cambios de dimensión del orden de 10^{-20} o menores.

Mecánica cuántica

Otro campo donde las ondas tienen un papel central es la mecánica cuántica, de la que aprendemos que todo tiene un carácter ondulatorio. Con la relación $E = hf$ (la energía es la constante de Planck por la frecuencia) Einstein puso en conexión la frecuencia ondulatoria de la luz con la energía de los cuantos discretos de la luz (fotones). De Broglie extendió esto a los electrones y demás materia ponderable. En el caso de las ondas clásicas la disipación amortigua el movimiento ondulatorio hasta que, por fin, todo queda en reposo. La mecánica cuántica enseña que las ondas de materia no sufren disipación. Hasta el estado fundamental del oscilador armónico tiene un movimiento armónico. Llevando esta última idea un paso más allá cabe conjeturar que la ubicuidad de las ondas es crucial para nuestro concepto de tiempo. El cambio es la manifestación del tiempo, y las oscilaciones regulares son una clara manifestación de cambio. Con toda razón, las ondas que se propagan en los cristales de cuarzo son ahora la herramienta dominante para medir el paso del tiempo.

Está claro que las ondas son ubicuas en la naturaleza y ocupan un lugar central tanto en la estructura de la materia y del tiempo como en muchos fenómenos físicos, biológicos y químicos. Es chocante que cueste tanto definir la noción de onda y que la distinción entre los comportamientos ondulatorio y no ondulatorio sea tan borrosa. Teniendo en cuenta todos estos ejemplos, nos quedamos con nuestra definición de onda como un desequilibrio organizado que se propaga, pero, eso sí, no se nos pida que definamos "organizado".

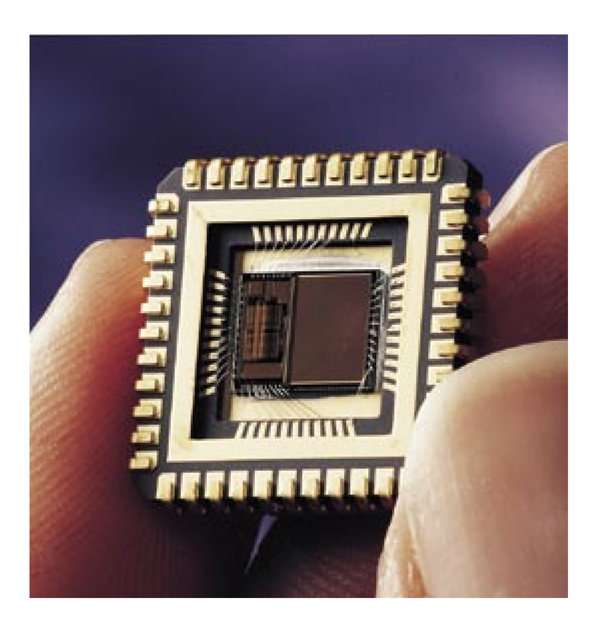
JOHN A. SCALES
Departamento de Geofísica
y Centro de Fenómenos
Ondulatorios, Escuela de Minas
de Colorado
ROEL SNIEDER
Departamento de Geofísica,
Universidad de Utrecht

Ver la luz

Sensores de imagen CMOS

Entre los cuentos felices de la era electrónica figura el dispositivo de carga acoplada (CCD), de presencia inexcusable allí donde hay que convertir la imagen en señales eléctricas. Los CCD son las "películas" electrónicas, reutilizables, de las cámaras digitales; constituyen, asimismo, componentes críticos de un sinfín de otros productos de electrónica de consumo.

Pese a tan sólida posición, los CCD van a tener que afrontar un temible desafío. El competidor recién llegado es el sensor CMOS, que, tras años de desarrollo, se dispone a tomar el mercado por asalto, merced a fuertes inversiones de Eastman Kodak, Motorola, Toshiba, Intel, Rockwell, Sarnoff y sus homólogos.



Sensor de imagen CMOS, integrado con otros elementos electrónicos

Se pronostica que una oleada de aparatos novedosos o de precios modestos, basados en sensores CMOS, multiplique la cuota de mercado de los sensores CMOS a lo largo de los años próximos. Estos sensores se hicieron con alrededor del 1,5 por ciento de los 678 millones de dólares invertidos en sensores de imágenes en 1996. En el año 2001 podrían representar al menos un 9 por ciento de un mercado que se cifra en 1564 millardos de dólares, según las previsiones de Brian O'Rourke, analista que sigue la evolución de los sensores de imágenes.

Las ventajas de los sensores CMOS emanan de su procedimiento de fabricación, sustancialmente el mismo que el de los semiconductores metal-óxido complementarios, utilizados en los circuitos integrados modernos, como los microprocesadores y las memorias dinámicas de acceso aleatorio. Los CCD, por su parte, se fabrican según una variante de una técnica en buena parte envejecida, llamada N-MOS (semiconductor metal-óxido de canal N).

Los sensores CMOS comparten con los microcircuitos CMOS su exiguo consumo de energía. Y lo que es más importante, los sensores CMOS pueden ser integrados directamente con otros elementos circuitales, por ejemplo, para la conversión de analógico en digital, o para el procesamiento de imágenes, con el resultado de mayor ahorro en costo, consumo energético y tamaño. En esas propiedades se fundan quienes adivinan la llegada pronta de la "cámara en un chip".

Se espera que esta economía en el coste de fabricación y su frugalidad energética abran nuevas aplicaciones para los sensores de imagen CMOS. La idea de instalar uno en un pequeño teléfono celular para producir un videófono de bolsillo es perfectamente factible. Otras de sus posibles aplicaciones pueden contarse en los asistentes personales digitales, en buscapersonas e incluso en juguetes.

Siendo tales las ventajas, ¿por qué no habrían los sensores CMOS de reemplazar a los CCD? Porque en este momento conllevan un sacrificio, y es la calidad de la imagen. Los sensores de imagen CMOS acostumbran ser más "ruidosos" que los CCD, lo que significa que la señal de la imagen sufre degradaciones por diversas causas. Para solventar este problema, algunos fabricantes, en especial Motorola, que se ha aliado con Kodak en el desarrollo de sensores CMOS, están retocando sus líneas de fabricación de CMOS para adaptarlas mejor a la producción de sensores.

GLENN ZORPETTE

Cambios en el CERN

Del LEP al LHC

Situado en los aledaños de Ginebra, el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares alberga el mayor acelerador de partículas, el Gran Colisionador de Electrones y Positrones (LEP). Desde 1989, el LEP ha venido generando haces rápidos y muy energéticos de electrones y de sus respectivas antipartículas —los positrones— para provocar luego el choque entre ambos. En las colisiones se emiten energía y partículas. Los haces de electrones y positrones adquieren velocidad y energía a medida que giran alrededor de un túnel circular de 27 kilómetros de circunferencia, enterrado a 100 metros de profundidad. Hay cuatro detectores en los puntos de colisión.

Durante estos años, los detectores del LEP han permitido identificar algunos de los constituyentes básicos de la materia que se hallaban presentes justo después de la gran explosión originaria. Pero los días del colisionador están contados. El acelerador permanecerá en servicio hasta octubre del próximo año, momento en que se cerrará y desmantelará para que culminen las últimas fases de construcción del Gran Colisionador de Hadrones (LHC).

Se espera que el LHC entre en funcionamiento en el año 2005. Cuando lo haga, producirá colisiones de partículas (en este caso, protones o núcleos de plomo) a energías y velocidades que para el LEP son inalcanzables. Uno de los objetivos principales del proyecto LHC es continuar la búsqueda del esquivo bosón de Higgs. Los físicos postulan que el espacio está repleto del campo de Higgs, y suponen que los quarks y los leptones adquieren sus masas interaccionando con él. El bosón de Higgs es una partícula asociada con este campo.

El nuevo acelerador se extenderá por los mismos 27 kilómetros de túnel que ahora ocupa el LEP, a lo que hay que sumar unos pocos túneles cortos de conexión y cuatro cámaras subterráneas para los detectores, uno de ellos el ATLAS, asentado en una cámara de 35 metros de altura y una base rectangular de 53 metros de largo por 30 metros de ancho, a unos 100 metros bajo la superficie.

SASHA NEMECEK

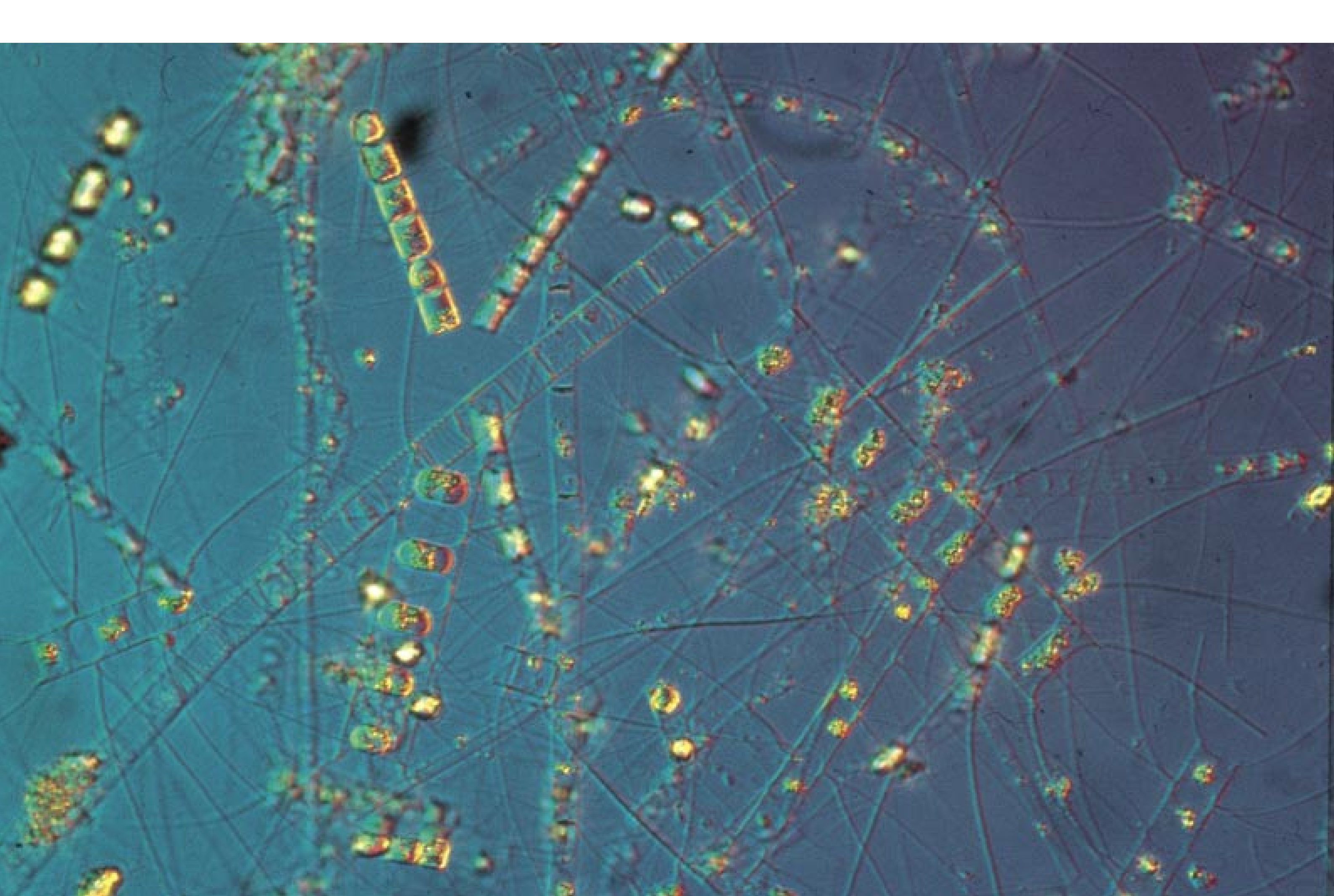
Texto y fotos: Maximino Delgado, Claude Carrè y Josep-Maria Gili

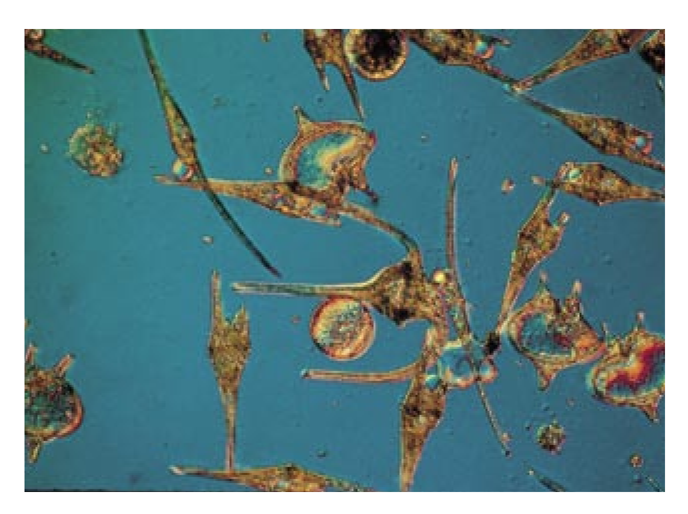
Diversidad y forma

La vida empieza en los océanos con los productores primarios, que aprovechan la energía lumínica para sintetizar materia orgánica y generan formas de vida espectaculares y abundantes: el fitoplancton. Hablamos de organismos con una tasa de reproducción muy rápida (desde menos de un día a varios días); presentan cambios en el tiempo muy notables. A los pocos días se observa una enorme variación en la composición específica. Las comunidades planctónicas difieren en estructura, forma y color a lo largo de las estaciones del año.

Los organismos fitoplanctónicos son la base de todas las cadenas tróficas marinas. Menudean desde la superficie hasta la zona de extinción de la luz. Formas unicelulares o coloniales, viven libres en la columna de agua, adheridas a objetos o sobre el fondo marino. Al igual que otros muchos organismos del plancton, tienen una amplia gama de estrategias para permanecer en las capas iluminadas del agua. Para evitar la sedimentación, las especies de fitoplancton fían en su tamaño (micrométrico), sin desdeñar otros mecanismos. Así, unos son móviles y poseen flagelos (como en dinoflagelados); dirigen su movimiento hacia la luz o realizan migraciones diarias en la columna de agua. Otras especies no tienen capacidad de movimiento propio (como las diatomeas planctónicas) y han de recurrir a estructuras que favorezcan la flotación (prolongaciones o setas). Hay quienes, como la dinoflagelada *Ceratium ranipes,* combinan los dos sistemas anteriores. Las diatomeas bentónicas, por su parte, sólo pueden desplazarse sobre superficies; ello, unido a su forma "sustratodinámica", les capacita para migrar hacia dentro y hacia afuera del sedimento.

1. Instantánea de una muestra de fitoplancton del mar Mediterráneo, dominada por diatomeas del género Chaetoceros

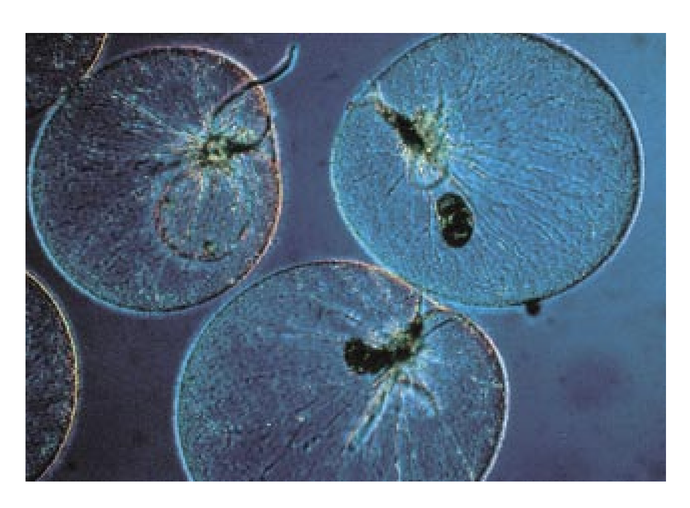




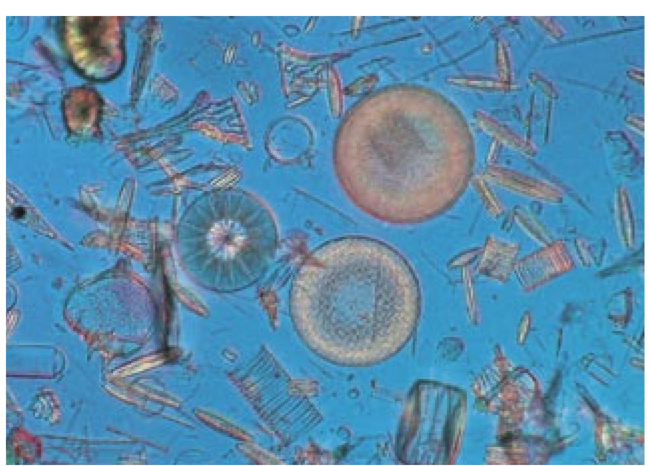
2. Comunidad de dinoflageladas, dominada por Ceratium *spp. y* Protoperidinium *spp.*



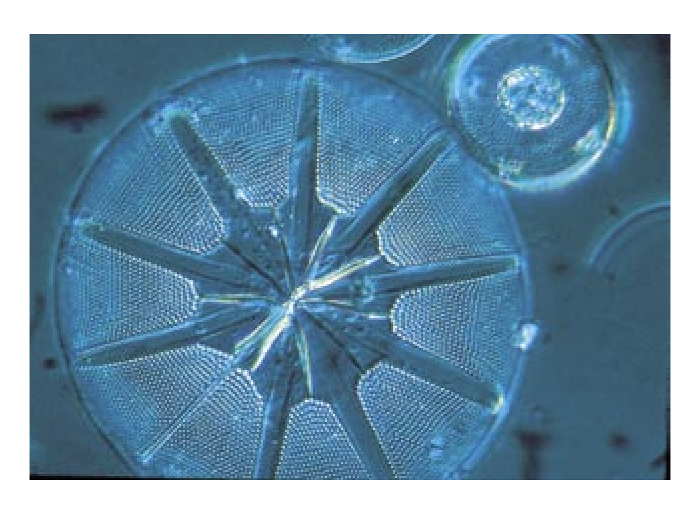
3. Ceratium ranipes*, una dinoflagelada*



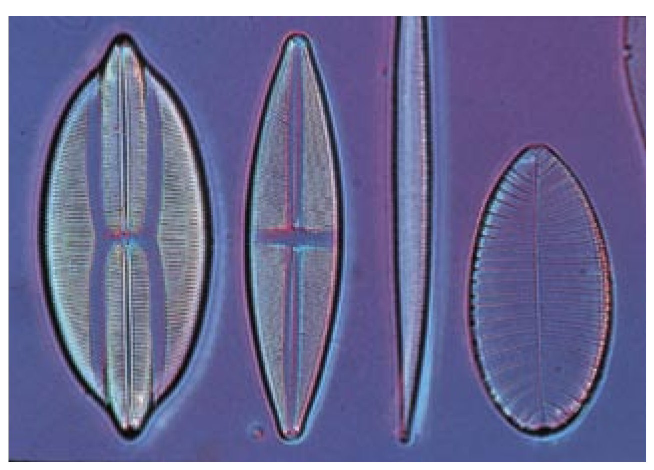
4. Ejemplares de la dinoflagelada heterotrófica Noctiluca scintillans



5. Comunidad variopinta de diatomeas planctónicas



6. Asterolampra *sp.*



7. Ejemplares ordenados manualmente de 3 especies distintas de diatomeas bentónicas

Hepatitis C



Se cuentan por millones los individuos infectados con el virus de la hepatitis C, en su mayoría sin saberlo

Adrian M. Di Bisceglie
y Bruce R. Bacon

Hasta avanzados los ochenta, ayer mismo como quien dice, no se oía hablar de la hepatitis C extramuros de la comunidad médica. Hoy es motivo de seria preocupación en todo el mundo. Esta infección de curso lento puede desembocar, en una veintena de años, en una grave patología hepática o en cáncer. Sólo en Estados Unidos, alrededor del 1,8 por ciento de la población adulta porta el virus de la hepatitis C; en su mayoría sin saberlo. Una de las causas principales de la enfermedad hepática crónica, hay que atribuir al virus probablemente más casos que al abuso del alcohol; también es la razón más habitual de los trasplantes de hígado. Unas 9000 personas mueren cada año en los Estados Unidos de complicaciones de la infección, cifra que se acepta que se triplicará hacia el 2010. Aunque la información acerca de la hepatitis C en otros países sea menos fiable, nadie cuestiona que nos hallamos ante un problema sanitario mundial.

Médicos, historiadores y mandos militares sabían que la hepatitis —inflamación del hígado— provocaba ictericia. La coloración amarilla en la zona blanca de los ojos y en la piel aparece cuando el hígado deja de segregar bilirrubina, un pigmento que se acumula en el organismo. Pero de unos decenios a esta parte, se ha avanzado en el diagnóstico de la hepatitis. Los médicos distinguen actualmente entre diversas formas. Hasta cinco virus diferentes, por lo menos, pueden causar la patología, amén de ciertos fármacos y sustancias tóxicas (alcohol).

La investigación de la hepatitis de origen vírico empezó en los años treinta. En ese decenio y en el siguiente el estudio abordó los enclaves de frecuente aparición de la ictericia: cárceles y frenopáticos. Identificaron dos formas distintas con diferentes pautas

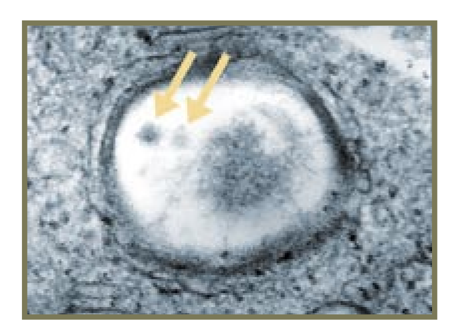
de transmisión. La que se transmitía por contacto con heces de individuos infectados recibió el nombre de hepatitis infecciosa, o hepatitis A. La otra parecía transmitirse sólo por la sangre y se la denominó hepatitis sérica, o hepatitis B.

Se produjo un avance importante mediado el siglo. Se idearon protocolos para determinar la lesión hepática basados en la presencia de ciertas enzimas en el suero sanguíneo. Cuando las células del hígado —los hepatocitos— mueren, liberan dichas enzimas en el torrente circulatorio, donde sus concentraciones pueden medirse con facilidad. Niveles séricos elevados de alanina aminotransferasa (ALT) y, sobre todo, de aspartato aminotransferasa (AST) pasaron a ser signos más fiables de alteración hepática que la ictericia. (Además de la hepatitis, existen algunas enfermedades metabólicas congénitas, poco frecuentes, que pueden incrementar la síntesis de enzimas hepáticas.)

Así estaban las cosas hasta que Baruch Blumberg, del norteamericano Instituto Nacional de la Salud (NIH), consiguió romper el frente a mediados de los años sesenta. Blumberg identificó la rúbrica de un agente vírico en la sangre de esos enfermos. (Se trataba, lo sabemos hoy, del virus de la hepatitis B.) Con su descubrimiento, que le valió el premio Nobel, Blumberg posibilitó el desarrollo de pruebas sanguíneas fiables para la detección del virus. Un decenio después Stephen M. Feinstone, del NIH también, identificaba un agente vírico diferente en las heces de enfermos con hepatitis A. En seguida llegaron las pruebas que permitían detectar anticuerpos contra el virus de la hepatitis A en la sangre de las personas infectadas.

Desde hace tiempo, la hepatitis viene amenazando a quienes reciben transfusiones y otros productos sanguíneos. En los años sesenta, de los receptores de transfusiones un 30 por ciento desarrollaba niveles elevados de ALT y AST, o incluso ictericia, unas semanas después. Se sospechaba de la culpabilidad de un agente infeccioso. Cuando aparecieron las nuevas pruebas de la hepatitis A y B, en los años setenta, se descubrió muy pronto que una proporción sustancial de casos de hepatitis detectados después de una transfusión no se debía a ninguno de estos dos virus. A la nueva entidad patológica se la denominó hepatitis "no-A, no-B".

Había un clima de esperanza en la identificación inmediata del agente responsable. Pero transcurrieron casi 15 años antes de que Michael Houghton y sus compañeros de la empresa Chiron hallaran el virus de la hepatitis C, tras el estudio de muestras de suero de chimpancés infectados que les había proporcionado Daniel W. Bradley, de los Centros de Control y Prevención de la Enfermedad. La hepatitis C representa la mayoría de los casos de hepatitis vírica que no pertenecen a los tipos A o B, aunque en ocasiones son el resultado de otros virus más raros.



1. ¿CULPABLE? Esta micrografía electrónica revela presumibles partículas de virus de la hepatitis C incluidas en una vesícula celular.

Aguja en un pajar de ARN

La hepatitis del virus C se resistió a la identificación por su renuencia al desarrollo en cultivo y porque chimpancés y tamarinos parecen ser los únicos animales susceptibles, además del hombre. En estos obstáculos, que aún impiden el estudio del virus, se esconde la razón de que estemos hablando del primer agente infeccioso descubierto por clonación de su ácido nucleico. El grupo de Chiron empezó por extraer el ARN de las muestras séricas con la seria sospecha de que portarían el agente vírico buscado. (El material genético de muchos virus es ARN, no ADN.) Puesto que hay también ARN en las células sanas, el problema estribaba en identificar la pequeñísima fracción correspondiente al genoma vírico desconocido.

En Chiron se sirvieron de una enzima para copiar fragmentos múltiples de ADN a partir de ARN; cada uno llevaba así parte de su secuencia genética. Insertaron luego este "ADN complementario" en entidades semejantes a virus que infectaban *Escherichia coli*; las bacterias se vieron impelidas a manufacturar fragmentos proteicos que este ADN codificaba. Los investigadores promovieron el desarrollo bacteriano y la formación de colonias. Y a continuación estudiaron la capacidad de dichos clones para inducir una reacción visible con el suero de chimpancés y una hepatitis humana no-A, no-B.

Se mantenía la esperanza de que los anticuerpos del suero se unieran a clones que producían la proteína del agente infeccioso. Del millón de clones bacterianos estudiados, sólo uno reaccionó con el suero de chimpancés enfermos, pero no con el suero de los mismos chimpancés antes de que sufrieran la infección. Del resultado se infería que este clon portaba secuencias genéticas del agente de la enfermedad. Se partió de ese clon para caracterizar después el resto del material genético y desarrollar el primer ensayo diagnóstico, una prueba que detecta anticuerpos de la hepatitis C en la sangre. Desde 1990 esta prueba diagnóstica y sus versiones posteriores han permitido investigar todas las muestras de sangre donadas a los bancos de sangre y determinar cualquier signo de infección.

La prueba con los anticuerpos demostró que la hepatitis C era una amenaza gravísima contra la salud pública. Por su tendencia a convertirse en crónica, se distingue de las infecciones producidas por la mayoría de los virus, que se autolimitan: la infección de hepatitis A no suele durar más allá de unas semanas, mientras que casi el 90 por ciento de las personas con hepatitis C la padecen durante años o decenios.

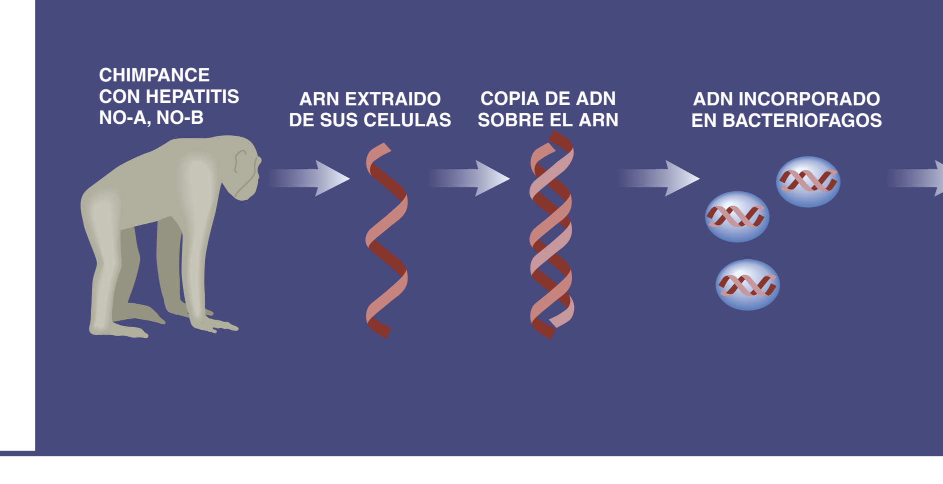
Los pacientes no suelen conocer el origen de su virus, pero sí recuerdan que recibieron una transfusión, se inyectaron droga o se pincharon con una aguja hipodérmica que contenía sangre de un individuo infectado. Alrededor del 40 por ciento de los pacientes que parecen exentos de esos factores de riesgo, caen de plano en otras categorías utilizadas por los epidemiólogos; nos referimos al mantenimiento de una relación sexual con algún paciente de hepatitis o con más de una persona durante el último año, y pertenecer a un estrato socioeconómico bajo.

No hay unanimidad sobre la transmisión de hepatitis C por vía sexual. Son muy raros los casos de transmisión entre personas que se atienen a una relación monógama estable. La tasa de infección entre varones homosexuales no es superior a la que se observa en la población en general. De ello podría inferirse una escasa incidencia por transmisión sexual, conclusión que resulta, sin embargo, difícil de conciliar con los

Así se descubrió el virus de la hepatitis C

Se identificó el virus de la hepatitis C mediante una estrategia bioquímica que consistió en obtener copias de ADN a partir del ARN extraído de células de chimpancés infectados. Para clonar el ADN se valieron de bacteriófagos que lo introdujeran en las bacterias. Se comprobó entonces si existían colonias positivas con el suero de chimpancés infectados. Una produjo reacción inmunitaria, lo que indicaba que llevaba en su interior secuencias genéticas víricas

—*A.M.D.* y *B.R.B.*



hallazgos epidemiológicos. La paradoja sigue sin resolverse. Algunos pacientes que niegan la inyección de drogas pueden ser incapaces de recordarlo o resistirse a confesarlo. Otros podrían haberse infectado con maquinillas de afeitar o instrumentos de tatuaje sin esterilizar. Las pajitas empleadas en la inhalación de drogas podrían transmitir también el virus a través de mínimas cantidades de sangre.

Progreso lento

El descubrimiento del virus de la hepatitis C y el desarrollo de una prueba segura de detección marcan un hito en el progreso de la salud pública. Se ha eliminado casi por completo el riesgo real de infección por transfusión. Más aún, el ritmo de infecciones entre drogadictos parece bajar, gracias a las campañas antisida que desaconsejan el uso compartido de jeringuillas. Pero la hepatitis C sigue presentando numerosos problemas, sin perspectiva de una plena erradicación del virus. La búsqueda de una vacuna se desmorona ante la comprobación de que ni siquiera los animales que aclaran el virus de su organismo logran adquirir inmunidad para una infección posterior. Y se cuentan por millones las personas con infección crónica, en peligro, por tanto, de contraer una enfermedad hepática grave.

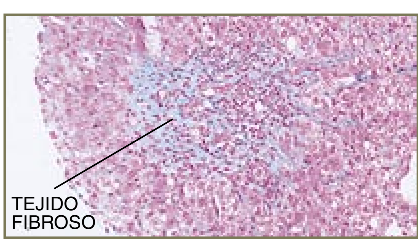
El mecanismo de la lesión se conoce en líneas generales. Las infecciones víricas pueden causar una lesión bien porque el virus mate las células directamente, bien porque el sistema inmunitario ataque directamente también las células infectadas. El virus de la hepatitis C provoca la enfermedad a través del segundo mecanismo. El sistema inmunitario posee dos divisiones operativas. Su componente humoral, responsable de la producción de anticuerpos, se revela harto ineficaz frente al virus de la hepatitis C. Aunque fabrica anticuerpos contra varios componentes del virus, los anticuerpos se muestran incapaces de neutralizar al invasor; su presencia no indica inmunidad, cosa que sí ocurre con la hepatitis B.

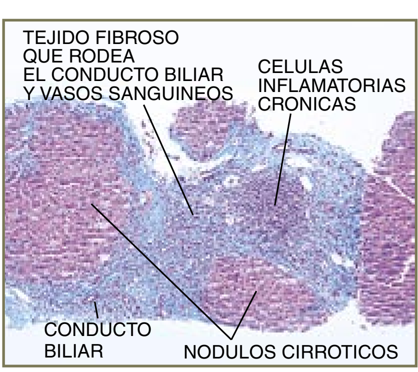
Quizás el virus de la hepatitis C se escapa de esta defensa amparado en su tasa de mutación, en particular de las regiones de su genoma responsables de la síntesis de proteínas en la zona externa del virus a la que los anticuerpos pueden unirse. Se han identificado dos de estas regiones hipervariables dentro de las regiones genómicas de la envoltura. Se han identificado hasta seis genotipos distintos y muchos otros subtipos del virus. Existen numerosas variantes incluso dentro un mismo paciente.

En contraste con el humoral, el componente celular del sistema inmunitario, que se especializa en las infecciones víricas, monta una defensa vigorosa frente a la hepatitis C. Parece ser responsable de buena parte de la lesión hepática. Los linfocitos citotóxicos T estimulados para el reconocimiento de las proteínas de la hepatitis C se encuentran en la circulación y en el hígado de individuos con infección crónica; hay razones para atribuirles la muerte de los hepatocitos que exponen proteínas víricas. Por fortuna, el tejido hepático se regenera bien, si bien no es raro que el de los pacientes con hepatitis presente numerosos hepatocitos muertos o agonizantes, amén de células inflamatorias crónicas (linfocitos y monocitos).

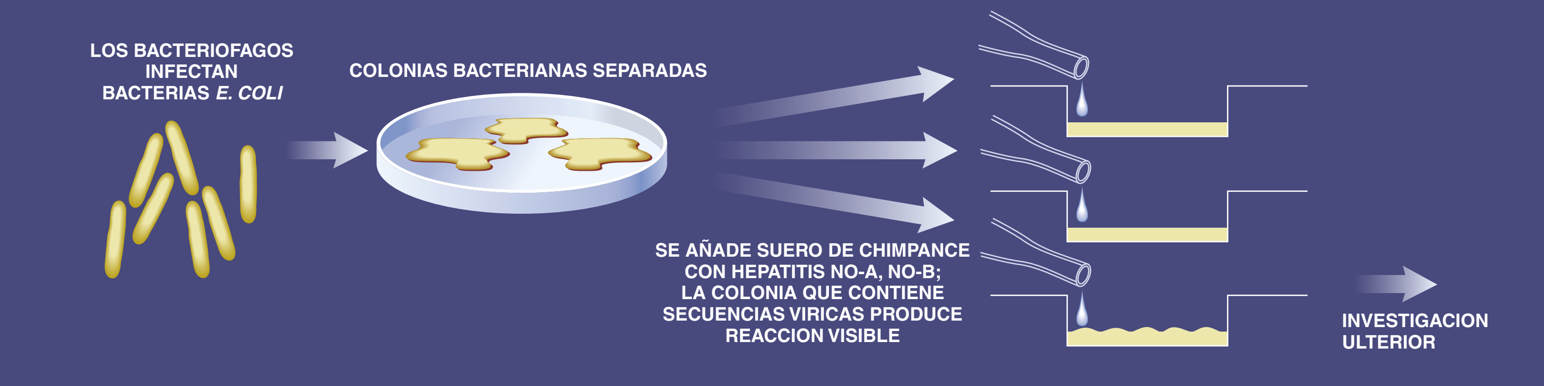
Consecuencias a largo plazo

Si la hepatitis persiste años, la afección progresa y las células estrelladas, adyacentes a los hepatocitos, abandonan su estado quiescente normal para activarse de un modo insólito. Estas células segregan colágeno y otras proteínas, que rompen la estructura fina del hígado y van minando su capacidad para procesar materiales. Se produce fibrosis. Por su origen y función, las estrelladas recuerdan a las otras células desencadenantes de fibrosis en otros órganos, como los fibroblastos de la piel y las células mesangiales del riñón. Almacenan vitamina A y producen la matriz extracelular del hígado, su entramado. Es posible que muchos de los procesos que inician la respuesta fibrótica del hígado ocurran en estos otros tejidos también.





2. EL TEJIDO HEPATICO de pacientes con hepatitis C muestra a menudo fibrosis —exceso de colágeno (*aquí teñido de azul*). La imagen superior da prueba de una fibrosis ligera típica. La imagen inferior corresponde a una cirrosis, patología grave en que el tejido fibroso rodea nódulos de hepatocitos que se regeneran; se aprecian también células inflamatorias crónicas.



Si la fibrosis se agrava, cursa con cirrosis, condición que se caracteriza por bandas de fibrosis que encierran nódulos de hepatocitos en regeneración. El progreso se acelera en personas de más de 50 años en el momento de la infección, en las que consumen más de 50 gramos de alcohol al día y en los varones. Pero la cirrosis puede darse también en pacientes que no prueban el alcohol. Fibrosis y cirrosis se suponen irreversibles, aunque ciertos hallazgos recientes ponen sordina a esa arraigada creencia.

Un 20 por ciento de los pacientes desarrollan cirrosis en los primeros 20 años de la infección. Con el tiempo, unos alcanzan un estado de equilibrio, sin nuevas lesiones hepáticas, mientras que otros continúan experimentando una fibrosis, aunque lenta, inexorable. En su estadio final la enfermedad hepática trasluce ictericia, ascitis (acumulación de líquido en el abdomen), hemorragias de venas varicosas en el esófago y confusión. La infección de hepatitis C constituye causa indirecta importante del cáncer primario de hígado. No es el virus por sí mismo el que nos coloca en situación de grave riesgo, sino la cirrosis inducida por el virus. La cirrosis es, en efecto, culpable del mal causado en la infección. Resulta anecdótico que algunos pacientes recuerden un episodio de ictericia, cuando adquirieron probablemente su infección; la hepatitis C crónica suele ser asintomática. Los signos, cuando se dan, resultan inespecíficos, vale decir, una sensación vaga de cansancio, náuseas o malestar general.

ADRIAN M. DI BISCEGLIE y BRUCE R. BACON han realizado una larga carrera en la investigación de la hepatitis C. Di Bisceglie, especialista en hepatitis vírica y cáncer primario de hígado, enseña en la facultad de medicina de la Universidad de San Luis, donde Bacon dirige la división de gastroenterología y hepatología.

En la naturaleza insidiosa de la afección hemos de buscar otra presumible razón de que se tardara tanto en descubrirse la hepatitis C. La enfermedad pasa inadvertida decenios enteros. Y ni siquiera todos los individuos infectados reaccionan de la misma manera. Algunos pueden portar el virus durante decenios sin sufrir lesiones de importancia; otros en cambio experimentan alteraciones graves en el curso de pocos años.

El trasplante de hígado puede salvar algunos pacientes en estado terminal, pero el suministro de hígados disponibles para el trasplante es del todo insuficiente. No hay más remedio que seguir trabajando en tratamientos que nos lleven a la erradicación del virus. El primer agente terapéutico que se mostró eficaz fue el interferón alfa, una proteína de nuestro organismo. El interferón desarrolla una acción antivírica inespecífica y puede elevar también la actividad del sistema inmunitario. El fármaco se administra generalmente por inyección subcutánea tres veces por semana durante 12 meses. Sin embargo, sólo entre un 15 y un 20 por ciento de los pacientes muestran una respuesta sostenida, definida por la vuelta de ALT y AST a los niveles normales y la ausencia de ARN del virus de la hepatitis C en suero durante al menos seis meses después de cumplido el tratamiento. Se ignora la razón del fracaso de la terapia en la mayoría de los pacientes, aunque se sabe que algunos genotipos parecen ser más susceptibles al interferón que otros.

En 1998, el ente norteamericano que entiende de alimentación y farmacia (FDA) aprobó otro medicamento, el ribavirín, para tratar la hepatitis C en unión con el interferón. El ribavirín inhibe muchos virus. Sin embargo, parece carecer de efecto directo sobre el de la hepatitis C. Lo que sí hace es reforzar los efectos del interferón sobre el sistema inmunitario. El interferón y el ribavirín administrados durante un período de seis a doce meses terminan por eliminar el virus en un 40 por ciento de los pacientes. Se busca ahora el modo de obtener el máximo beneficio de la administración conjunta de ambos agentes. La atención se ha centrado en formas de interferón de uso prolongado que requieren su administración sólo una vez a la semana.

En período de prueba, se está administrando otra medicina a un número restringido de pacientes. La compañía Vertex Pharmaceuticals investiga un compuesto que inhibe la inosina monofosfato deshidrogenasa. El virus de la hepatitis C cuenta con la intervención de esta enzima humana para formar los componentes de su ARN. Se desconocen los resultados de estas pruebas.

A falta de medicamentos contundentes con el virus, el NIH acaba de embarcarse en un estudio para establecer si la administración a largo plazo de interferón alfa puede frenar el progreso de la lesión hepática en pacientes incapaces de aclarar el virus. Por nuestra parte estamos investigando los efectos de la extracción regular de medio litro de sangre. Con ello rebajamos la cantidad de hierro en el organismo, con la caída consiguiente de los niveles de ALT y AST. Nos queda por confirmar si además frena el desarrollo de la lesión hepática.

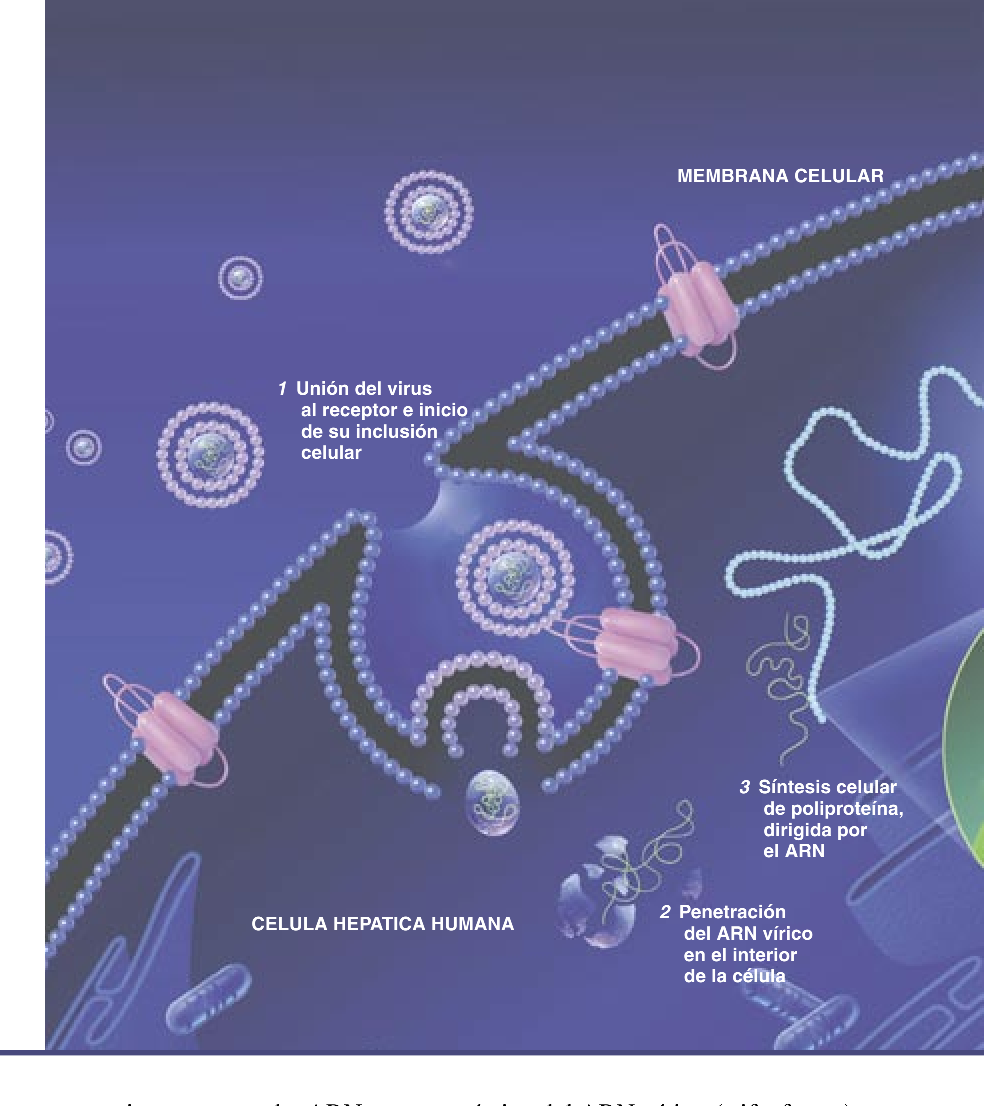
El virus como objetivo final

Las mejores perspectivas para un tratamiento eficaz de la hepatitis C recaen en los agentes dirigidos de intento contra el virus. Lo mismo que los de cualquier tratamiento útil

Así se reproduce el virus de la hepatitis C

La infección con el virus de la hepatitis C comienza cuando las partículas víricas del torrente circulatorio encuentran el camino para penetrar en células predispuestas, hepatocitos en particular. Por lo que se ve, la proteína E2, vírica, facilita la entrada al engancharse en un receptor específico. Al penetrar, el virus pierde su capa lipídica y su envoltura proteínica, con lo que se libera su ARN. Las enzimas de la célula lo toman de molde para sintetizar una proteína vírica de gran tamaño, la poliproteína. Esta se escinde en varias proteínas pequeñas que se integran hasta formar nuevas partículas víricas y participan en la labor de copia del ARN vírico.

El ARN vírico se copia para dar un ARN de hebra "negativa", que porta la secuencia inversa, o complementaria, de la original. Este sirve de molde para realizar copias múltiples del ARN original, que se incorpora en nuevas partículas víricas, junto con proteínas estructurales, en el complejo de Golgi. De la célula infectada terminarán por salir partículas víricas completas, después de adquirir una capa lipídica envolvente. Estudios recientes sugieren que un paciente produce hasta mil millones de copias de virus de hepatitis C al día, la mayoría en el hígado.—*A.M.D.* y *B.R.B.*



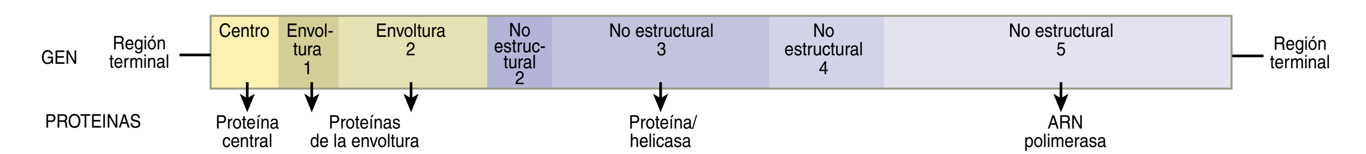
para el sida. Con ese objetivo, se determinó la estructura fina del virus de la hepatitis C. Su genoma consta de una sola hebra de ARN. Por su tamaño y organización, este genoma se asemeja al de los virus de la fiebre amarilla y el dengue. De ahí que se incluya entre los virus de la familia Flaviviridae. Las enzimas del interior celular se valen del ARN vírico para producir poliproteína, una proteína enorme que se escinde luego en múltiples proteínas con funciones peculiares. Algunas son proteínas estructurales, que formarán nuevas partículas víricas; otras son enzimas que replican el ARN original infeccioso. A ambos lados del genoma existen zonas de ARN que no se traducen en proteínas. Una de esas regiones terminales parece ser la promotora de que las células infectadas manufacturen la poliproteína vírica; hacia ese dominio se ordenan las pruebas de diagnóstico. El otro extremo interviene, a buen seguro, en la iniciación de la replicación del ARN vírico.

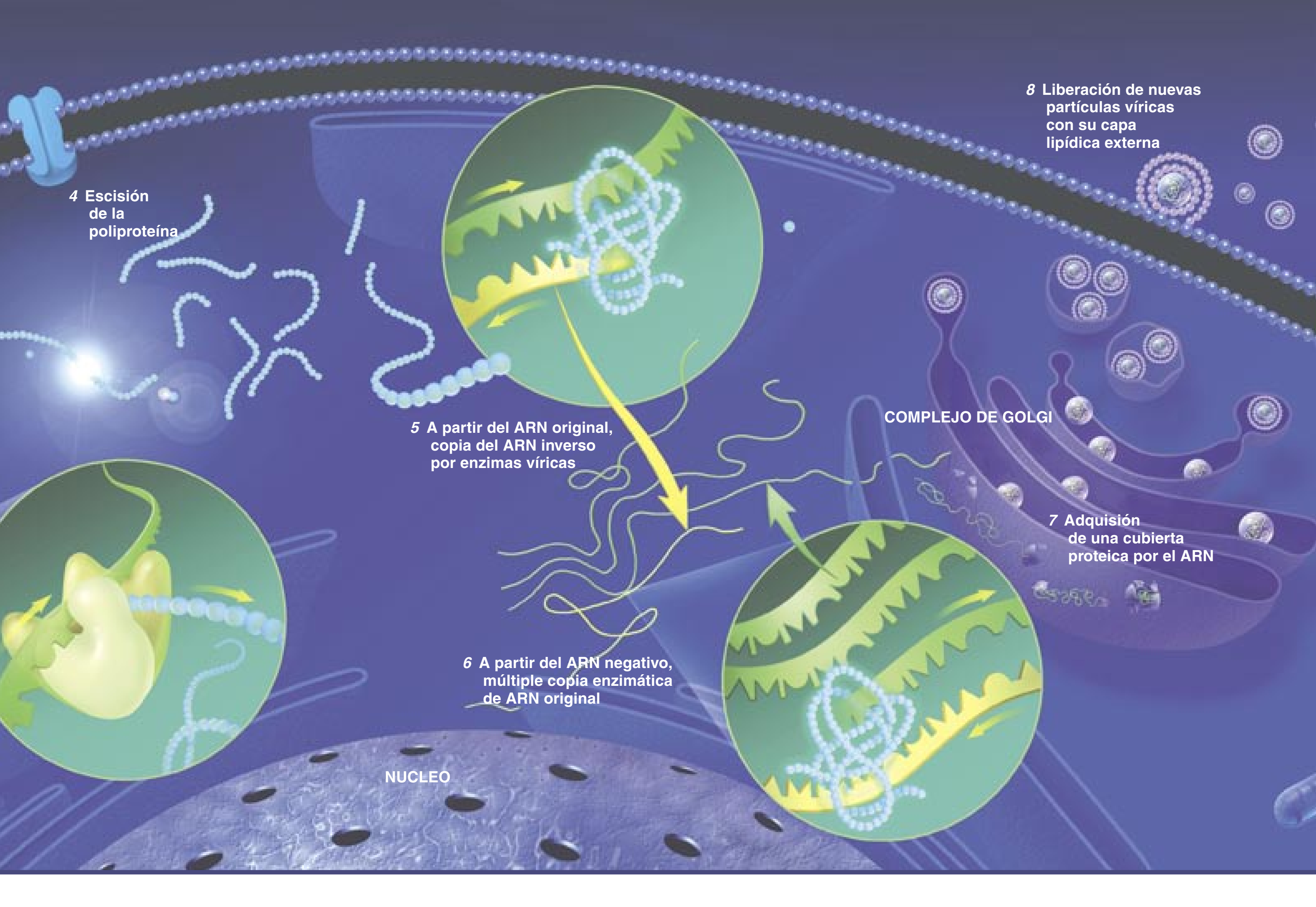
La proteína nuclear, de función estructural, ciñe al ARN para dar una partícula vírica dentro de la nucleocápside. Entre las proteínas no estructurales hay una proteasa vírica responsable de la escisión de la poliproteína, así como otras enzimas que se ocupan de la preparación química del ARN vírico (trifosfatasa), de copiar el ARN (polimerasa) y de desenrollar la copia recién sintetizada (helicasa).

Se ha logrado ya la caracterización de la proteasa y la helicasa. Por cristalografía de rayos X se ha dilucidado también su estructura tridimensional. Tras esos pasos obligados para el diseño de fármacos inhibidores de enzimas, las compañías Shering-Plough, Agouron Pharmaceuticals y Eli Lilly y Vertex Pharmaceuticals estudian inhibidores potenciales de la proteasa y de la helicasa de la hepatitis C. Es de esperar que dentro de pocos años comiencen las pruebas clínicas. Se avanza también en la polimerasa. Habrá que ver si el virus se torna resistente frente a estos agentes.

En un futuro inmediato podrían idearse terapias antihepatitis C más

3. GENOMA DEL VIRUS DE LA HEPATITIS C, constituido por un gen de ARN con dos regiones terminales. El gen determina una poliproteína, que posteriormente se escinde para formar diversas proteínas menores. De éstas, unas se usan para hacer nuevas partículas víricas y otras son enzimas que intervienen en la replicación del ARN vírico para su inclusión en virus nuevos.





fáciles. Hace escasos meses, el equipo encabezado por Ralf Bartenschlager, de la Universidad Johannes-Gutenberg de Maguncia, publicó un informe sobre un constructo genético de ARN que incluye las regiones codificadoras de las enzimas del virus y se autorreproduce en líneas celulares de cáncer hepático. El constructo en cuestión podría ser muy útil para abordar fármacos dirigidos contra estas enzimas.

Se ha acometido la investigación de la interrupción brusca del proceso que activa las células estrelladas y las insta a promover la fibrosis. Se sabe que en este mecanismo participan citoquinas, o señales químicas, que las células hepáticas de Kupfer liberan estimuladas por linfocitos. La suspensión del proceso, una vez iniciado, debería prevenir la mayoría de las consecuencias indeseables de la infección de la hepatitis C.

Algunos investigadores se han centrado en las regiones terminales cortas del genoma del virus. Una idea que persigue Ribozyme Pharmaceuticals es el desarrollo de moléculas terapéuticas que puedan cortar allí secuencias terapéuticas constantes. Las ribozimas, breves cadenas de ARN o productos químicos relacionados, pueden conseguirlo. La dificultad podría estribar en la introducción de suficientes ribozimas en las células infectadas. La administración de cantidades adecuadas de un agente terapéutico constituye un problema compartido por tratamientos innovadores. Podríamos encontrar entre éstos la terapia génica que dotara a las células hepáticas de resistencia contra la infección, el ARN "antisentido", que pueda inhibir genes específicos, y proteínas construidas por ingeniería genética, que activen un mecanismo de autodestrucción de la célula cuando las corte la proteasa de la hepatitis C.

Esta lucha contra la hepatitis C, desde tantos frentes, necesita una generosa subvención, que no suele darse. Si los gobiernos fueran sensibles a la amenaza que se cierne sobre millones de ciudadanos se mostrarían menos reticentes. Confiamos en que las terapias mejorarán con el tiempo, sin descontar una posible vacuna.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MANAGEMENT OF HEPATITIS C. National Institutes of Health Consensus Development Conference Panel Statement. En *Hepatology*, vol. 26, suplemento n.º 1, págs. 2S-10S; 1997.

INTERFERON ALFA-2B ALONE OR IN COMBINATION WITH RIBAVIRIN AS INITIAL TREATMENT FOR CHRONIC HEPATITIS C. John G. McHutchison y cols. en *New England Journal of Medicine*, vol. 339, n.º 21, págs. 1485-1492; 19 de noviembre de 1998.

MOLECULAR CHARACTERIZATION OF HEPATITIS C VIRUS. Segunda edición. Karen E. Reed y Charles M. Rice en *Hepatitis C Virus*. Dirigida por H. W. Reesink. Karger, Basilea, 1998.

REPLICATION OF SUBGENOMIC HEPATITIS C VIRUS RNAS IN A HEPATOMA CELL LINE. V. Lohman, F. Körner, J.-O. Koch, U. Herian, L. Theilmann y R. Bartenschlager en *Science*, volumen 285, págs. 110-113; 2 de julio de 1999.

Brotes de formación estelar

Estructuras de brillo intenso, los brotes, nacidos de la macroagregación de complejos moleculares, forman sistemas de estrellas que modifican la morfología y la evolución de las galaxias

Casiana Muñoz Tuñón y Guillermo Tenorio Tagle

Se cuentan por centenares, por miles, las estrellas de masa ingente que se despojan con violencia de sus capas más externas, desgarran el gas que encuentran a su alrededor, lo empujan hacia el medio interestelar y lo apilan en nubes inmensas. Fotones ultravioleta ionizan el gas que ciñe a las estrellas. Estamos ante un brote estelar (*starburst*).

Las estrellas masivas se forman en grupo o asociación. No hay mayores aglomeraciones que en los brotes. La energía involucrada en el desarrollo de un brote estelar deja su sello en los discos de las galaxias, huellas que perduran millones de años, estructurando el medio interestelar y en ocasiones la apariencia general de algunas galaxias.

En buena medida, el material expulsado por las estrellas masivas se ha ido transformando a través de reacciones termonucleares. Estas son inevitables, si consideramos las densidades y temperaturas que reinan en el corazón de las estrellas. Tales reacciones transforman el hidrógeno en helio, luego en carbono, en oxígeno, en hierro, que termina siendo arrojado durante la explosión de supernovas.

Todos los elementos químicos se han sintetizado en hornos estelares. En un brote, con sus múltiples estrellas masivas, hallamos las mayores factorías de metales. En astrofísica, metal es cualquier elemento más pesado que el hidrógeno o el helio.

¿Cómo se originan estos brotes violentos de formación de estrellas? ¿Cuál es su impacto y qué papel desempeñan en la vida de una galaxia? ¿Cuáles son los procesos físicos que llevan a estructurar el medio interestelar alrededor de estos objetos? Las respuestas que demos definirán el conjunto de parámetros a utilizar en los modelos de formación y evolución de las galaxias.

De los brotes pueden emerger miles de millones de estrellas. Un 10 por ciento de éstas tienen una masa mayor que ocho veces la masa solar. Sin nada que lo impida, mueren en el canto del cisne que es la explosión de supernova. (La masa del Sol es 2×10^{27} toneladas.) En efecto, cuanto mayor masa posee una estrella, más breve es su vida. Si tiene 100 masas solares, explotará a los tres millones de años; si veinte veces la masa del Sol, vivirá 10 millones de años; si ocho masas solares, su vida se prolonga allende los 50 millones de años. Comparados con la edad de la galaxia, los brotes estelares son sistemas muy jóvenes.

Dentro de las estrellas masivas, las de 20 veces la masa solar emiten un flujo intenso de fotones ultravioleta (superior a los 10^{48} fotones por segundo) y fotoionizan el hidrógeno del medio circundante, "iluminándolo" y haciéndolo visible a telescopios ópticos. El volumen de las nubes de hidrógeno fotoionizado, donde los átomos de hidrógeno han perdido su único electrón, se llama región HII. El II romano caracteriza a la región con hidrógeno ionizado y la distingue de las que constan de hidrógeno en estado neutro, HI.

Dentro de la región HII, el hidrógeno en estado de plasma se afana por capturar el electrón que le falta. Durante la vida de las estrellas más masivas, el flujo ultravioleta restablecerá continuamente la ionización del plasma. El proceso incesante de ionización y recombinación de los átomos de hidrógeno lleva a la producción de líneas de emisión en el espectro de la región HII. Así, la emisión Hα a la longitud de onda $\lambda = 6563$ angstrom en la parte roja del espectro visible es una de las empleadas para identificar y cartografiar las áreas de gas caliente.

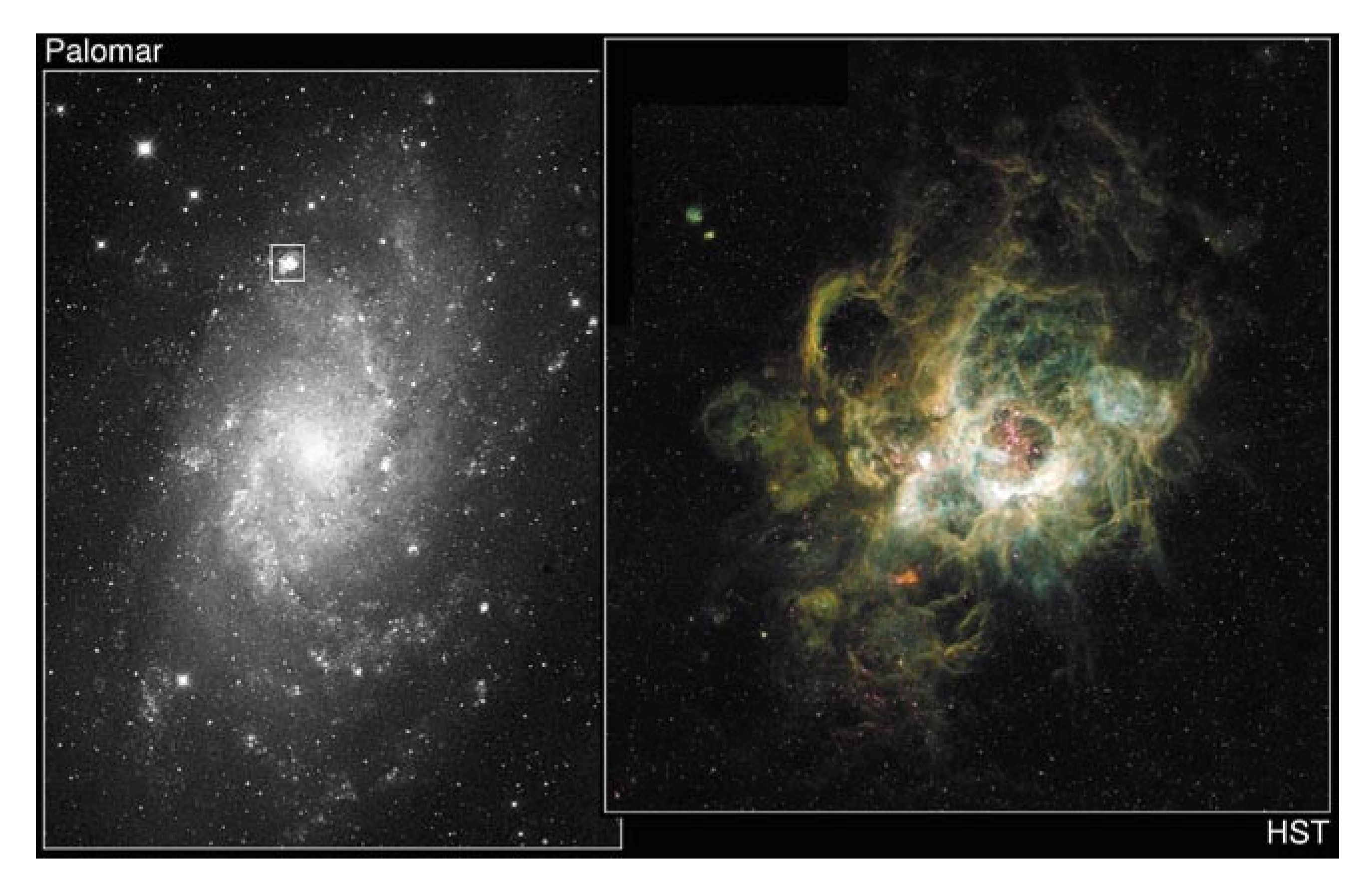
Las regiones HII asociadas a brotes imponentes miden más de 500 parsecs de diámetro (1 parsec equivale a 3,3 años luz). Se les llama regiones HII gigantes, para distinguirlas de las asociadas a nubes con tamaños de decenas de parsecs, que están ionizadas por un numero pequeño de estrellas.

Si contemplamos el universo inmediato, lo más parecido a un brote estelar es la nebulosa de Orión. Situada a 1500 años luz de distancia, en la constelación del mismo nombre, parece a simple vista una mancha difusa. Pero se trata de una nube de gas de unos 10 parsecs de diámetro que se deja ver gracias a la fotoionización producida por las estrellas masivas. Orión, que contiene sólo algunas estrellas masivas, es mucho más modesto que un brote estelar; a escala, nos hallamos ante un sistema cien veces menor que el menos llamativo de los brotes estelares.

Gracias a su intensa luminosidad, los brotes se localizan fácilmente en las galaxias espirales, por ejemplo, donde aparecen sobre los brazos. Así, en M 101 se ven focos luminosos, nebulosidades de centenas de parsecs, que resaltan sobre el trazado de los brazos espirales.

En M 33, galaxia del Grupo Local, cúmulo al que pertenece la Vía Láctea,

CASIANA MUÑOZ TUÑÓN y GUILLERMO TENORIO TAGLE vienen colaborando desde hace años en temas relacionados con el artículo. Muñoz Tuñón es investigadora del Instituto de Astrofísica de Canarias y Tenorio Tagle, profesor invitado del Instituto de Astronomía de la Universidad de Cambridge.



1. GALAXIA ESPIRAL M 33 (*izquierda*) y de su región HII gigante, la nebulosa NGC 604 (*derecha*). En el centro de la nebulosa hay unas 200 estrellas a una temperatura de decenas de miles de grados kelvin, con una masa de 15 a 60 veces la solar; esos objetos fotoionizan el gas de la nebulosa haciéndolo visible en el rango óptico del espectro electromagnético. Obtenidas ambas imágenes por el Telescopio Espacial Hubble, la de NGC 604 fue tomada con diferentes filtros, que combinados permiten obtener la imagen en color. La imagen de la galaxia anfitriona, M 33, está tomada con un único filtro, de ahí que sea monocromática. Distinguimos en la imagen un sinfín de arcos y filamentos que resultan de la energía mecánica de las estrellas masivas sobre el medio interestelar. Los vientos estelares y las explosiones de supernova que sufren estas estrellas generan ondas de choque que acaban apilando el gas que encuentran, confiriendo a la nebulosa una estructura llena de burbujas y huecos.

se encuentran otros dos ejemplos de brotes que, al brillar tanto, han sido catalogados como objetos con entidad propia. Los brotes de M 33 se llaman NGC 604 y NGC 588. Forman sistemas enormes y aislados, de apariencia diferenciada del resto de las nebulosidades que trazan los brazos espirales, son mayores, más luminosos y, a primera vista, de forma redondeada.

La Gran Nube de Magallanes (LMC), a 160.000 años luz, es una galaxia irregular del Grupo Local de galaxias. Aloja el brote más cercano de todos los censados, la nebulosa de la Tarántula, iluminada por el grupo de estrellas 30 Doradus. Aunque la Gran Nube de Magallanes tiene una masa total de 10.000 millones de masas solares, un décimo de la masa de la Vía Láctea, es muy rica en gas. Ahí se esconde quizás una de las razones por las cuales su brote estelar, 30 Doradus, es mucho mayor que cualquiera de la Vía Láctea.

Hay otras razones que conducen a la formación de brotes masivos de estrellas. La LMC tiene una estructura barrada, resultado verosímil de procesos de interacción entre galaxias, que podrían haber inducido la formación de grandes complejos moleculares, materia prima para la generación de un brote violento.

Las galaxias irregulares, de apariencia amorfa y estructura poco definida, abundan en el universo. Sin la masa de las espirales, su rango se halla entre 1000 y 10.000 millones de veces la solar, es decir, la centésima parte de la masa típica de una galaxia espiral. Muchas encajan en la clasificación de galaxias enanas.

Abundan las irregulares ricas en gas. Así, la Nube de Magallanes y, por extensión, las Irregulares Magallánicas (IM). Las IM disfrutan de notable capacidad para formar estrellas y son prolíficas generando brotes; por citar una, la galaxia NGC 4449 tiene 40 brotes catalogados. La masa total involucrada en estos fenómenos es de varios millones de masas solares; en esa cifra hay que incluir el material convertido en estrellas, el gas ionizado por luz ultravioleta y el material restante, ya sea hidrógeno neutro o molecular (H_2).

Saltemos a brotes estelares más imponentes, con cientos de miles de estrellas masivas. Se dan en los núcleos de galaxias, espirales o irregulares. Ejemplos de estos brotes nucleares, así se les llama, son las galaxias M 82 y NGC 253. La galaxia irregular M 82 acoge en su núcleo un brote muy aparatoso, donde se registran frecuentes explosiones de supernovas, con una luminosidad que rebasa la luz conjunta de la galaxia entera. Del brote nuclear surgen filamentos radiales que recuerdan la estructura de los rayos producidos en una tormenta y se extienden miles de parsecs de distancia.

La galaxia espiral NGC 253 alberga en su núcleo un brote de gran energía. Presenta ella una hermosa estructura espiral con brazos sembrados de nubes de gas fluorescente, que se retuercen abrazando a una zona central brillante y extensa. NGC 253 está a 10 millones de años luz y es miembro de un grupo de galaxias en la dirección de la constelación Escultor, en el hemisferio sur. Rodeada de polvo, que cela su estructura interior. La formación estelar violenta está confinada al núcleo en una región de unos 1000 años luz de dimensión. Como en todos los brotes violentos, el ritmo de formación de estrellas es alto; se identificó merced al exceso de radiación en el rango infrarrojo emitido por el polvo caliente que atraviesa la región del brote.

Los brotes más luminosos residen en el interior de las IRAS, galaxias ultraluminosas descubiertas por el satélite IRAS ("Infrared Astronomical Satellite"). Estos objetos celestes, muy concentrados, emiten en el rango infrarrojo del espectro, alrededor de 100 micras, irradiando más de un billón de veces la luminosidad del Sol. Algunas sólo se dejan ver en el infrarrojo, pero otras coinciden con objetos ya detectados en el rango óptico.

La emisión proviene de grandes cantidades de polvo caliente a una temperatura de cientos de grados kelvin. La emisión térmica de los granos de polvo es el resultado de su exposición al flujo incidente de fotones liberados por las estrellas. De esos fotones, se absorbe una fracción y se produce el calentamiento. La temperatura de equilibrio se alcanza cuando la reemisión térmica de los granos interestelares en el infrarrojo —los granos radian energía al enfriarse— compensa la absorción de los fotones que llegan de la luz de las estrellas. En nubes de polvo frías, la temperatura de equilibrio es aproximadamente 10 grados kelvin, pero el polvo situado en la cercanía de las fuentes estelares puede estar mucho más caliente.

El desplome gravitatorio de nubes inmensas de gas desemboca en la creación de estrellas. La caída de gas sobre sí mismo provoca las densidades y temperaturas que permiten la colisión frecuente de los núcleos atómicos, favoreciendo su transmutación y liberando enorme energía que, al ser absorbida por las capas exteriores, éstas detienen la pérdida de energía y convierten la masa de gas en fuentes luminosas, en estrellas.

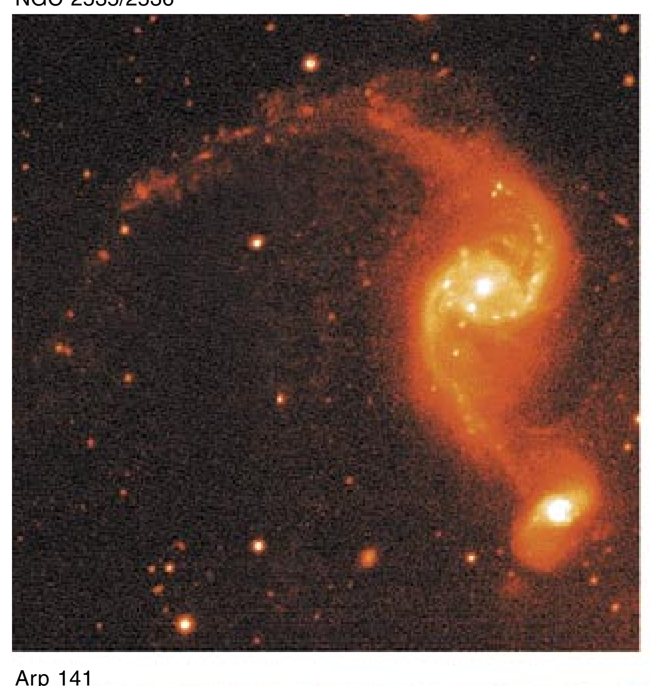
De la nube que se hunde, sólo un porcentaje termina transformándose en estrellas. El resto sale despedido hacia el medio interestelar.

Para formar un brote se requieren cantidades fantásticas de gas. Aunque éste abunda en las galaxias, los lugares idóneos para la gestación de estrellas son las regiones más densas,

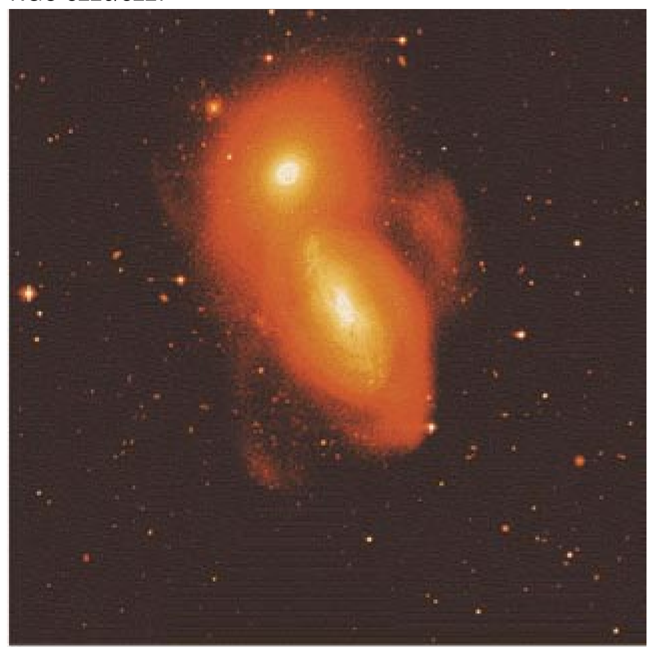


2. GALAXIA IRREGULAR NGC 2366 (*izquierda*) y ampliación de la región gigante de formación de estrellas en la misma (*derecha*). La imagen de la galaxia fue obtenida con el telescopio CFHT (Canadá-Francia-Hawai) de Mauna Kea, en Hawai; la ampliación, con el Telescopio Espacial Hubble. Se trata de una galaxia magallánica con una distribución de estrellas que le dan apariencia de barra luminosa. En astrofísica se llaman irregulares de tipo magallánico las galaxias que se parecen a la Gran Nube de Magallanes. La región gigante de formación de estrellas es muy parecida al brote que observamos en la Gran Nube de Magallanes, la nebulosa de la Tarántula, fotoionizada por el cúmulo de estrellas llamado 30 Doradus. Las observaciones de galaxias de tipo magallánico como NGC 2366 nos ayudarán a entender por qué galaxias tan débiles y tan pequeñas pueden generar brotes de formación de estrellas tan luminosos y masivos. La barra luminosa de estrellas podría ayudar a la acumulación de gas y a la formación de nubes grandes de hidrógeno molecular que serán la semilla de brotes potentes.

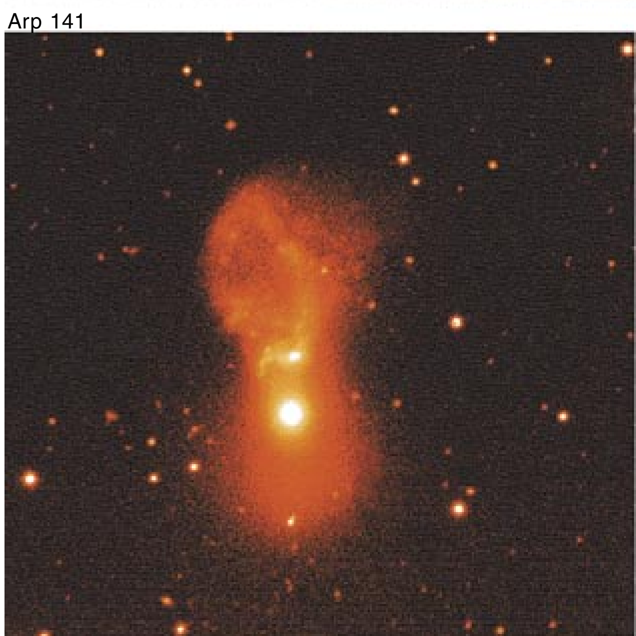
NGC 2535/2536



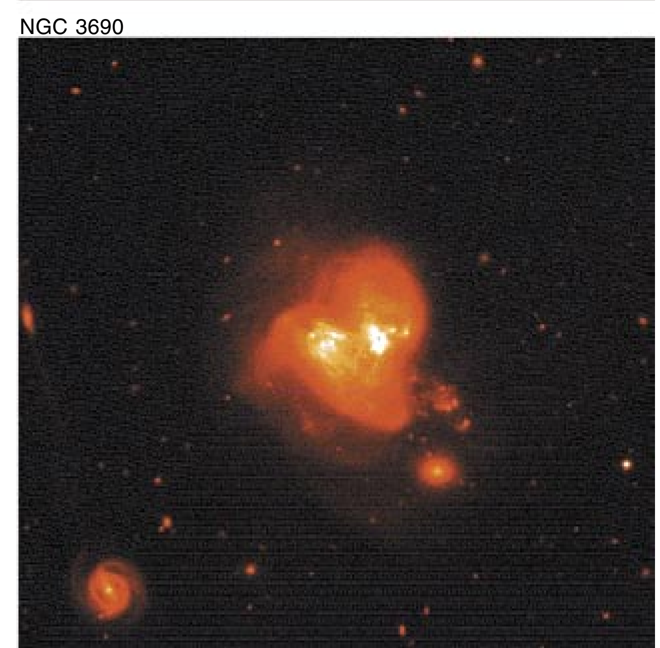
NGC 3226/3227



Arp 141



NGC 3690



3. GALAXIAS EN INTERACCION. En 1966, Halton Arp mostró las deformaciones y figuras extrañas que adoptaban las sometidas a una interacción gravitatoria, llevándolas en su caso más extremo a la fusión con otras galaxias. Las imágenes de las cuatro que presentamos han sido tomadas con el telescopio Isaac Newton de 2,5 m del Observatorio del Roque de los Muchachos en la isla de La Palma. El título que aparece sobre cada imagen de la figura corresponde al número de clasificación de la galaxia según el New General Catalogue (NGC); en el caso de la Arp 141 usamos la numeración correspondiente al catálogo de Arp. Todas ellas presentan estructuras diferentes y dos núcleos, pertenecientes a cada una de las galaxias que se están fusionando. Al final del proceso de fusión se perderán los restos de la morfología individual y sólo podremos ver un núcleo.

los complejos de nubes moleculares. Tales complejos equivalen a veces a un millón de masas solares. La aparición de un brote estelar exige nubes muy densas.

No conocemos bien los procesos que llevan a la formación de nubes moleculares. Sí sabemos que, para fraguar moléculas, hay que blindar el gas frente a la radiación ultravioleta de las estrellas, pues toda molécula expuesta a esa radiación se disocia.

Se necesitan grandes cantidades de gas y polvo para apantallar el gas interior y proteger la síntesis de moléculas. En los brazos de galaxias espirales abundan las aglomeraciones de material capaces de aportar el blindaje. En esas acumulaciones, una suerte de pozos o silos, se apila el material; los complejos moleculares que de ellos resultan adoptan una figura alargada, de un centenar de parsecs. El contenido de los complejos moleculares de la Vía Láctea, detectado por transiciones en las frecuencias de radio, multiplica millones de veces la masa solar.

Se han propuesto otros mecanismos para la formación de nubes molecula-



4. LAS ANTENAS, ejemplo espectacular de la fusión de las galaxias NGC 4038 y NGC 4039. Este objeto presenta dos colas luminosas que emergen de la parte central y son el resultado de las fuerzas de marea que se originan en la fusión de dos galaxias. La imagen, ampliada, de la zona central muestra los núcleos de las dos galaxias; se ven como condensaciones de color naranja. Las bandas oscuras son filamentos de polvo (grafito y silicatos) que los atraviesan; la estructura pseudoespiral está plagada de estrellas calientes, azules en la imagen, que son el resultado de la formación estelar que se ha disparado en el proceso de colisión de las dos galaxias. En el centro del encuentro se detectan miles de estrellas brillantes, jóvenes y masivas, un poderoso brote que se ha generado como resultado de la interacción gravitatoria.

res. Según unos se trata de la mera aglomeración de nubes menores que han quedado encajadas tras un choque. Recurren otros a la inestabilidad gravitatoria a gran escala. El proceso implica el colapso gravitatorio de un sector importante de la galaxia, de miles de años luz de dimensión, que comprime y protege, mediante la gravedad, volúmenes ingentes de gas y origina complejos moleculares. Estos mecanismos llevan a la formación de nubes moleculares concentradas en el plano de la galaxia y es ahí donde harán acto de presencia los brotes estelares.

Hay también procesos físicos que causan cambios drásticos en el potencial gravitatorio de las galaxias, con las consiguientes modificaciones bruscas en la distribución de su masa que conducen a la acumulación local de cantidades ingentes de gas. A través de esos procesos, en las barras de estrellas, que cruzan los núcleos galácticos, y también en éstos, se amontonan miles de millones de masas solares de gas en escasas decenas de millones de años.

Tales fenómenos de agitación cósmica pudieron hacerse frecuentes en fases precoces del universo, cuando la densidad de galaxias era muy alta. Tienen mayor incidencia dentro de los cúmulos galácticos. A ese respecto, los procesos de fusión han potenciado la formación de macrogalaxias cuya masa supera en varios órdenes de magnitud la Vía Láctea.

La fusión e interacción de galaxias puede desembocar en la formación de galaxias enanas satélite, que aparecería de manera preferente en las "colas de marea". En un trabajo que venimos desarrollando en el Instituto de Astrofísica de Canarias hemos encontrado que, en el campo que rodea las galaxias interactuantes, se registra una densidad más alta de objetos extensos que podrían ser las enanas predichas por los modelos teóricos.

La investigación, todavía en curso, proseguirá con el análisis de los espectros de luz emitida por los distintos objetos, para su ulterior clasificación. Los espectros resolverán si se trata de galaxias enanas con estrellas que están emitiendo la radiación observada o si son condensaciones de gas —nódulos un poco más densos— que se forman en las colas de marea y que son visibles gracias a los fotones ionizantes de la poderosa fuente central constituida por el brote resultante de la interacción.

No sólo el canibalismo de galaxias lleva a la acumulación de gas y al nacimiento de nubes moleculares. Basta el paso por la proximidad o la interacción entre galaxias para arrancar pedazos sustantivos de una y arrastrarlos hacia la otra, tendiendo así un puente de conexión. Lo comprobamos en "la corriente de Magallanes",

que fluye desde la Nube Mayor de Magallanes hacia la parte externa de la galaxia. El contacto cercano entre dos galaxias insta también un cambio repentino en el potencial gravitatorio de ambas y sus núcleos reciben una avalancha de material que les llueve desde los discos.

Por tanto, en los brazos de galaxias espirales, en las barras de galaxias irregulares y espirales, en los núcleos galácticos y en los lugares de interacción o fusión intergaláctica se engendran los complejos moleculares dotados de mayor masa, semillas donde germinarán los brotes.

En el estudio de brotes masivos de formación estelar importa encontrar el número de estrellas en cada rango de masa, lo que se llama la función inicial de masa (IMF). Inició esa línea de trabajo E. Salpeter, de la Universidad de Cornell. Sus resultados han recibido confirmación del estudio sobre las asociaciones de estrellas en nuestra galaxia y sobre cúmulos extragalácticos.



5. M 15, UN CUMULO GLOBULAR DE LA GALAXIA, el más denso conocido, en esta imagen tomada con el telescopio Isaac Newton de 2,5 m del Observatorio del Roque de los Muchachos en la isla de La Palma. El cúmulo se encuentra en la Vía Láctea, a una distancia de 37.000 años luz. Tiene una edad aproximada de 12.000 millones de años y se caracteriza por la elevada densidad de estrellas que hay en su núcleo. Cada cúmulo constituye una galaxia en miniatura, con un número total de estrellas que va desde 100.000 hasta un millón, apiñadas en una estructura esférica. Los mayores cúmulos globulares, entre los que se incluye M 15 en la constelación de Pegaso, se perciben a simple vista en una noche oscura sin luna. Los cúmulos globulares casi no contienen gas o polvo y no muestran indicios de formación estelar reciente. Son "restos primigenios", sistemas que se formaron durante el nacimiento de la Vía Láctea. Constituyen excelentes laboratorios para estudiar la evolución estelar y además sirven para establecer límites a la edad del universo.

La IMF presenta dos notas distintivas. Primera, una ley de potencias con un exponente –2,3, que caracteriza a las estrellas cuya masa supere la solar; segunda, un cambio drástico de pendiente para masas por debajo de la solar. Por la función inicial de masa se sabe que el 10 % de la masa de una asociación se encuentra en estrellas de más de 10 masas solares, responsables directas del daño visible en el medio circundante. Por otra parte, el cambio de pendiente para masas pequeñas nos remite a una escasez de estrellas de masa menor que la solar y, al mismo tiempo, indica que casi toda la masa de un cúmulo corresponde a estrellas de tipo solar.

Los cúmulos globulares son brotes estelares masivos que emergieron hace mucho tiempo, cuando surgió nuestra galaxia. Sólo muestran lo que queda de ellos, tras 12.000 millones de años de evolución. En la Vía Láctea, galaxia espiral arquetípica, distinguimos diversos componentes: un disco casi plano, sobre el cual se asientan los brazos espirales, y un núcleo central con una densidad de estrellas muy alta rodeado por el bulbo, estructura esferoidal y de naturaleza estelar, que se extiende hasta radios de hasta 2 o 3 kiloparsecs.

En el disco se concentra el gas de la galaxia. El hidrógeno molecular, a unos 10 grados kelvin, el hidrógeno atómico (HI), que tiene temperaturas de alrededor de 1000 kelvin, y el hidrógeno ionizado (HII) por el flujo ultravioleta de las estrellas masivas y cuya temperatura se eleva a 10.000 kelvin. A modo de globo, lo envuelve todo el halo de la galaxia, caracterizado por un gas de baja densidad, a temperaturas de algunos millones de grados kelvin. En él se distribuyen los cúmulos globulares, los sistemas más antiguos que se encuentran en una espiral.

En la Vía Láctea hay más de un centenar de cúmulos globulares (CG). Estas concentraciones de estrellas, de hasta un millón de "soles" ligados por fuerzas gravitatorias, describen un sinnúmero de órbitas y trayectorias dentro del volumen restringido que ocupan. Son sistemas en equilibrio cuya masa total, dimensión y dispersión de velocidades obedecen al teorema del virial, con la energía potencial igual a dos veces la energía cinética total de cada sistema. Los CG son objetos estelares, sin resto alguno de gas interestelar. Por su avanzada edad, carecen ya de estrellas masivas; éstas, al quemar rápidamente su combustible nuclear, son efímeras.

En las estrellas masivas, la energía liberada en las reacciones operadas en el núcleo acaba superando a la energía gravitatoria que mantiene unido al plasma estelar. En razón de ello, las capas exteriores salen despedidas al medio interestelar en ráfagas o vientos intensos que van desnudando el corazón de la estrella. Al final de su vida, todas las estrellas masivas explotan convertidas en supernova, autodestruyéndose y dispersando el producto de su evolución.

Los vientos estelares y las explosiones de supernova generan una enorme cantidad de energía mecánica, al acelerar al material procesado hasta varios miles de kilómetros por segundo. Semejante celeridad, allende la velocidad del sonido en el medio interestelar, desencadenan fuertes ondas de choque que barren y aceleran cuanto material interestelar encuentran a su paso; lo apilan en cascarones que alcanzan dimensiones de hasta cientos de miles de veces el tamaño de sus estrellas generadoras.

Remontándonos varios miles de millones de años hacia atrás en el tiempo, observaríamos cúmulos globulares en la brevísima fase en que aún contenían estrellas dotadas de abundante masa y gran cantidad

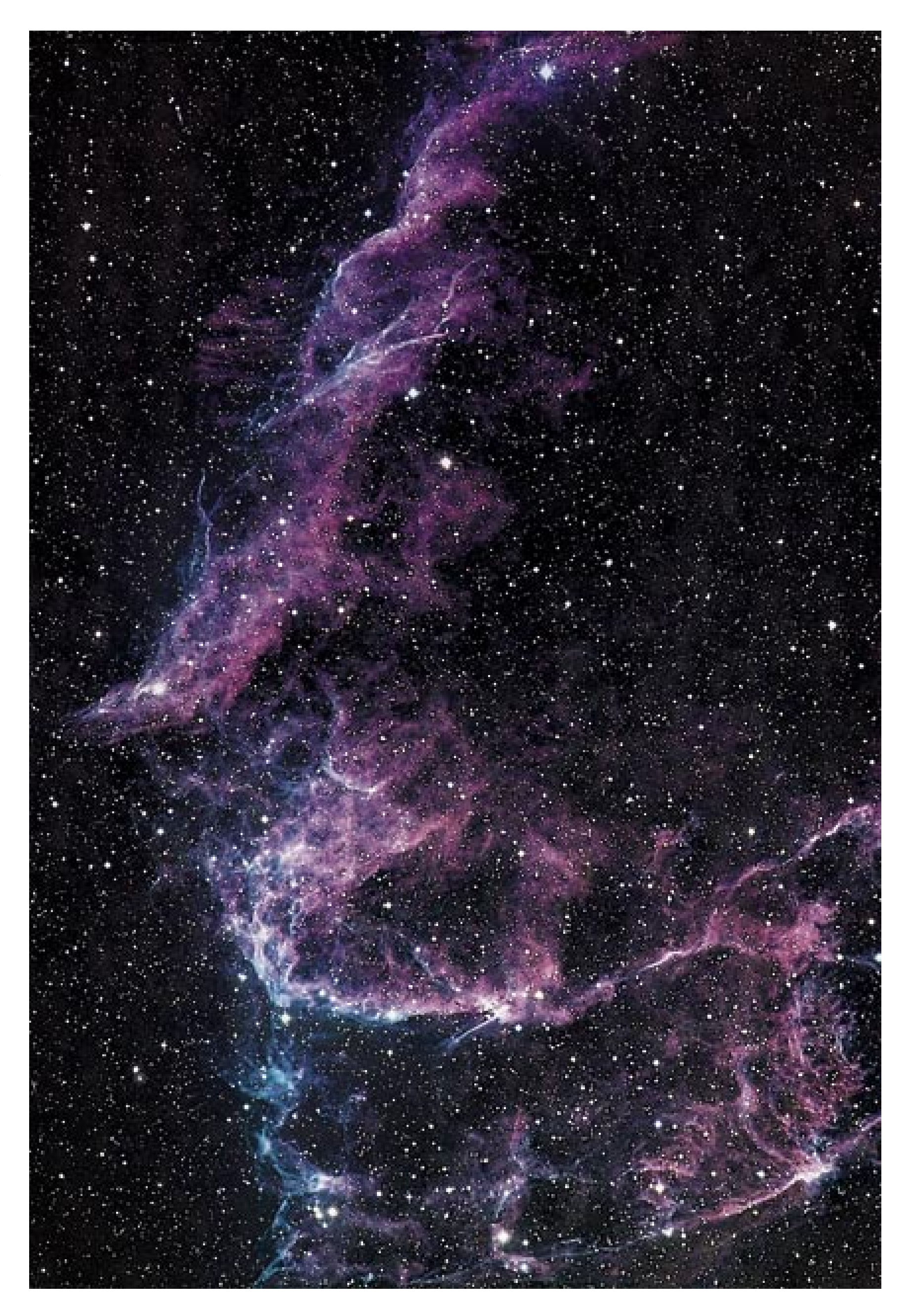
de gas. Nos referimos a la "era de la acción", en que el material que participó en el desplome, aunque sin extinguirse en estrella, se vio lanzado lejos del cúmulo, exento de la atracción gravitatoria ejercida por la acumulación de estrellas y diluido en una medio muy distante del punto de la galaxia donde se originó. A la aparición de las estrellas masivas le precedió, por necesidad, una larga fase de formación de estrellas de baja masa.

La formación de estrellas requiere el previo desplome de una cuantía importante de material. Para crear un brote estelar, la acumulación hundida tiene que ser aún mayor. Millones de masas solares pueden transformarse en estrellas. En el caso extremo de brotes nucleares, hay miles de millones de estrellas que actúan al unísono en la manifestación más luminosa de la formación estelar.

Algunos modelos predicen la fragmentación repentina de este gas en millones de pequeñas estructuras, origen, cada microestructura, de una protoestrella. El colapso gravitatorio de una gran nube molecular no engendra un objeto supermasivo central y único, sino millones de estrellas. De ahí se infiere la necesidad de la fragmentación múltiple. Resulta, sin embargo, difícil saber si el proceso de fragmentación es instantáneo en toda la nube o si nacen estrellas poco a poco, a lo largo del proceso de colapso gravitatorio.

Si las estrellas se forman poco a poco, es preciso que aparezcan primero las de menor masa, los soles, los millones de soles que encontramos aun después de que las estrellas masivas hayan perecido, restos fósiles del intenso proceso de generación estelar que aconteció en la nube primigenia. El colapso gravitatorio se inicia cuando las temperaturas son muy bajas, entre 10 y 100 grados kelvin. Las estrellas de baja masa deben, pues, emerger primero, ya que al aparecer las estrellas masivas, más energéticas y destructivas, calientan al gas inhibiendo su colapso y, con ello, la producción de más estrellas. Para cuando aparecen las estrellas masivas, se han constituido ya todas las estrellas de baja masa del brote violento.

Un factor importante a considerar es la "eficiencia de la formación estelar" (ε). Representa el porcentaje del material de la nube que termina convertido en estrella. (Nube sometida a desplome gravitatorio, por supuesto.) El parámetro indica cuánto material



gaseoso queda en el sistema, una vez terminada la formación estelar. Se requiere un buen rendimiento, por encima del 50 %, para justificar la existencia de un cúmulo globular. Además, tras la aparición de las estrellas masivas y su acción dispersora sobre el material restante, el sistema ha de retener aún masa suficiente para persistir integrado mediante la acción de la gravedad.

Los cúmulos de estrellas menos estructurados, trabados con un rendimiento débil, acaban dispersados cuando el material gaseoso sale despedido, muy lejos, por las estrellas masivas. Estos cúmulos que se dispersan, también llamados cúmulos abiertos, se diluyen en unos cien millones de años.

En el caso de brotes nucleares de galaxias espirales, la hidrodinámica explica las grandes estructuras cónicas filamentarias y los supervientos que lanzan el material de la galaxia hacia el medio intergaláctico.

Durante los años ochenta se hizo evidente que las estrellas masivas aparecían en grupos. Tales asociaciones causarían, obligadamente, un impacto en su entorno. La acción conjunta de fuertes vientos estelares, sumada a la explosión secuencial de las estrellas más masivas, denunciaba no sólo una gran cantidad de energía depositada en un volumen pequeño, comparado

6. DEL IMPACTO DE EXPLOSIONES ESTELARES en el medio interestelar nos habla Vela, resto de una supernova que explotó en nuestra galaxia. Tomada con el telescopio Isaac Newton de 2,5 m del Observatorio del Roque de los Muchachos, la imagen en falso color se obtuvo combinando imágenes de la nebulosa en tres filtros. Una vez las estrellas han convertido el hidrógeno de su núcleo en helio y éste en carbono y después en oxígeno y en hierro, dejan de generar energía. La transmutación de hierro en elementos más pesados consume energía en vez de liberarla. En ese momento, el corazón de la estrella se desploma, con velocidades cercanas a la de la luz y, en fracciones de segundo, se compacta hasta alcanzar densidades nucleares. No pudiendo comprimirse más, el interior de la estrella experimenta un rebote y produce una onda de choque, que barre las capas estelares exteriores, acelerándolas a varios miles de kilómetros por segundo y desmantelando la estrella, haciéndola explotar. La onda de choque desplaza y apila el material interestelar cercano a la explosión. Cuando la masa de material barrido supera la cantidad lanzada durante la explosión, el cascarón empieza a decelerar. Se forma una segunda onda de choque, que se enfrenta al material eyectado transformando su energía cinética en energía térmica. El material estrella alcanza una temperatura de varias decenas de millones de grados kelvin, que le hace expandirse. En ese momento tenemos una gran burbuja, encerrada por una pared esférica. De este modo, la energía térmica del gas-estrella continúa empujando a través del cascarón la onda de choque principal, mientras que ésta sigue apilando el material interestelar hallado. El material caliente intenta deshacerse del exceso de energía acumulada irradiándola y al hacerlo va perdiendo temperatura. El enfriamiento radiativo produce una disminución de volumen y así el material barrido se condensa en una cáscara más fría y muy delgada. Con el tiempo, la temperatura baja lo suficiente y la densidad se hace mayor por el efecto de condensación; podemos verla emitiendo a las longitudes de onda correspondientes al rango óptico del espectro. La burbuja, aún muy caliente, emite radiación de muy alta energía, detectable en el rango de los rayos X. La expansión de la burbuja decrece a medida que aumenta la masa del material que va apilando. Cuando el ritmo de expansión se asemeja ya a la velocidad de los movimientos caóticos del medio interestelar (unos cuantos kilómetros por segundo), la cáscara de material barrido comienza a ser despedazada por impactos con el medio circundante, perdiendo su forma y movimiento de expansión, para deshacerse, diluida en el medio interestelar.

con las dimensiones de la galaxia, sino que, además, toda esta energía se produciría durante la corta vida de las estrellas masivas (unos cincuenta millones de años).

En consecuencia, el impacto producido por estrellas masivas, situadas en el espacio y en el tiempo, promovería la creación de grandes estructuras, burbujas y cascarones, capaces de alcanzar y sobrepasar las dimensiones del disco de la galaxia que las acoge. La acción de todas las estrellas, muy próximas unas de otras, se asemeja en seguida a la de una fuente singular que reuniera el poder integrado del conjunto estelar. La evolución resultante remeda entonces el curso seguido por la explosión de una supernova, aunque con la energía de miles de ellas.

Dado el tamaño finito de los discos galácticos, las estructuras que se generan alcanzan la escala de altura del disco. Así, la onda de choque se acelera penetrando en el halo galáctico, mientras que el sector correspondiente del cascarón de material que ha barrido se fragmenta por culpa de inestabilidades del tipo de Rayleigh Taylor, inducidas por la aceleración súbita del cascarón al encontrarse con la orilla del disco galáctico.

La rotura del cascarón facilita el flujo libre del material procesado —rico en metales— hacia el halo galáctico. Se desencadena un torrente de gas de alta temperatura que recalienta el halo de las galaxias y dispersa, además, los elementos pesados sintetizados en la evolución estelar; los envía lejos del brote de formación estelar que los originó.

Si partimos de una galaxia donde la densidad del medio interestelar decrece suavemente con la distancia al plano galáctico, difiere bastante la respuesta hidrodinámica del sistema a la gran energía liberada por un brote violento. En este caso, el cascarón del material barrido, empujado por la burbuja creada con material lanzado por la estrella, no se rompe, aunque sí puede deformarse al crecer más rápidamente en la dirección de los polos galácticos. La evolución llega a su fin después de la ultima explosión de supernova. Al terminarse el suministro de energía, el gas caliente comenzará a enfriarse y a depositarse en el disco galáctico.

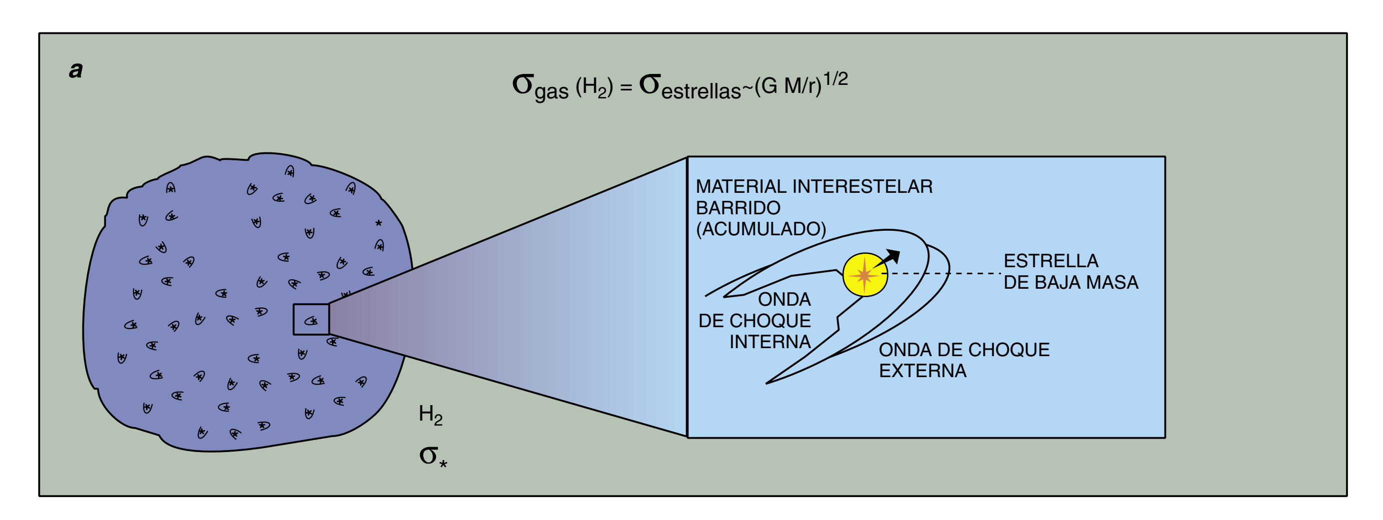
En los núcleos de galaxias espirales y en los de muchas otras galaxias se asiste a la eclosión de brotes violentos de formación estelar. Las galaxias amorfas, en vez de brotes esparcidos, presentan una concentración central de la formación estelar. Las galaxias enanas o HII tienen una gran parte de su hidrógeno ionizado por la radiación ultravioleta que emana de las estrellas masivas del brote nuclear. Todos estos tipos de galaxias portan un halo extenso de hidrógeno neutro de muy baja densidad, que termina acotando el alcance de la energética estelar.

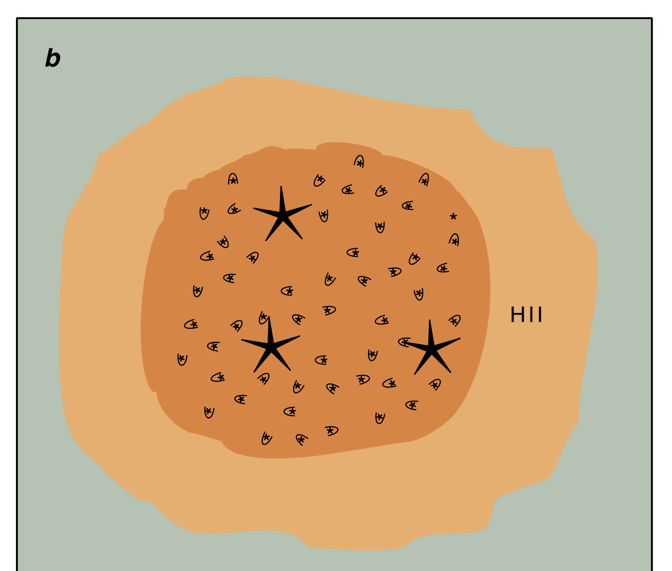
La dimensión de los núcleos ionizados es de algunos miles de años luz, tamaño que duplican o triplican las superburbujas organizadas por la energía mecánica estelar. Estas estructuras dibujan una herradura anclada en el brote de formación nuclear. Sin embargo, los halos de material neutro, claramente visibles en la línea de 21 cm del hidrógeno neutro, son hasta diez veces mayores. A algunas de estas galaxias, dado su bajo contenido en metales, se las consideró galaxias primigenias. Cierto es que entre ella están los objetos menos metálicos del universo.

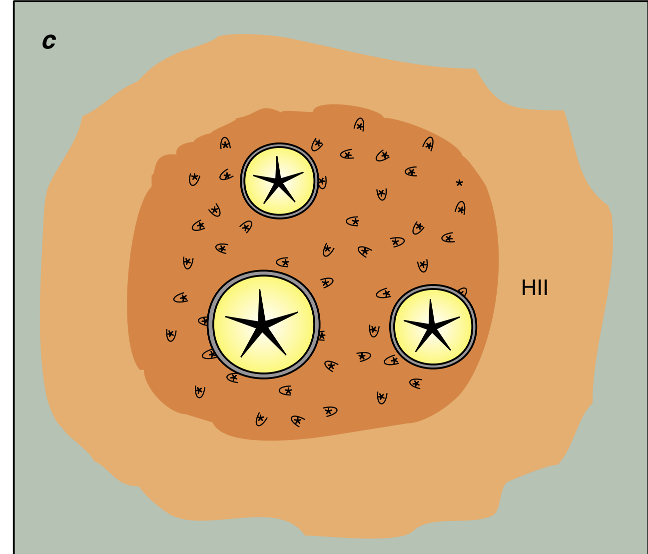
La propia ausencia de elementos pesados, resultado directo de la evolución estelar, llevó a suponer que en esas galaxias se estaba observando el primer episodio de formación de estrellas de toda su historia. Más adelante se pensó que lo que sucedía era que estas galaxias, mínimas, podían deshacerse fácilmente de sus metales. Los cascarones de material barrido, encerrando superburbujas con material estelar, muy caliente y con alto contenido en metales, no tardarían en crecer hasta exceder las dimensiones de la galaxia. Cuando el cascarón se liberase de ésta, se despedazaría con la liberación plena del material procesado y encerrado. Los metales, sueltos, en el medio intergaláctico limpiarían la galaxia de los restos de la evolución estelar.

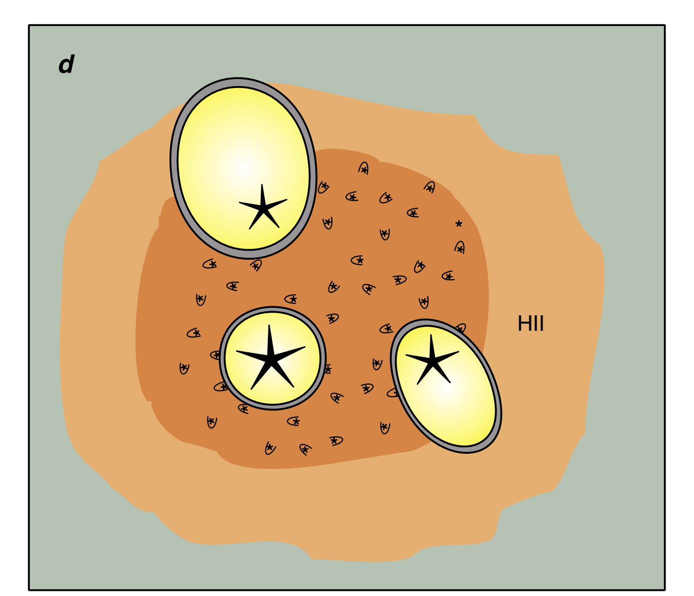
Semejante cuadro, archidivulgado, permitía justificar el bajo contenido en metales que se aprecia en galaxias enanas; explicaba también la contaminación de elementos pesados que se observa en el medio intergaláctico. Pero a medida que la sensibilidad de los radiotelescopios aumentaba y se disponía de antenas de superficies mayores, se han venido "extendiendo" las galaxias, detectando la emisión del hidrógeno neutro más allá de sus límites supuestos.

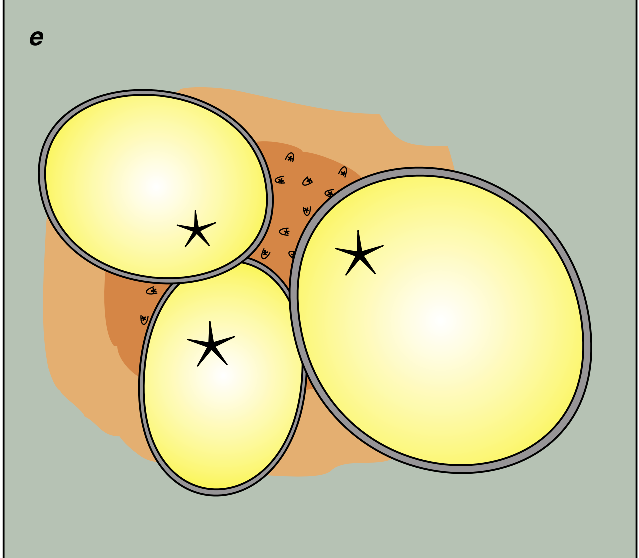
Los halos galácticos de hidrógeno neutro que engloban a las imágenes de los cascarones demuestran, sin embargo, que tales galaxias no pueden lanzar sus metales al medio interga-

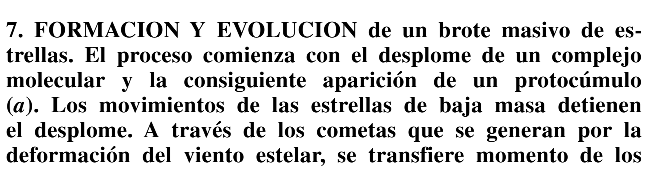











7. FORMACION Y EVOLUCION de un brote masivo de estrellas. El proceso comienza con el desplome de un complejo molecular y la consiguiente aparición de un protocúmulo (*a*). Los movimientos de las estrellas de baja masa detienen el desplome. A través de los cometas que se generan por la deformación del viento estelar, se transfiere momento de los millones de soles al gas. Las estrellas dotadas de gran masa (*símbolos asteriformes*) fotoionizan el gas circundante y crean la región HII gigante (*b*). Paulatinamente las estrellas masivas van gestando burbujas y cascarones que, al trascender las dimensiones de la nube, se romperán dispersando el gas encerrado (*c, d y e*)

láctico. Las dimensiones y velocidad de expansión de las superburbujas nos revelan que los metales alojados no pueden llegar al confín de su galaxia.

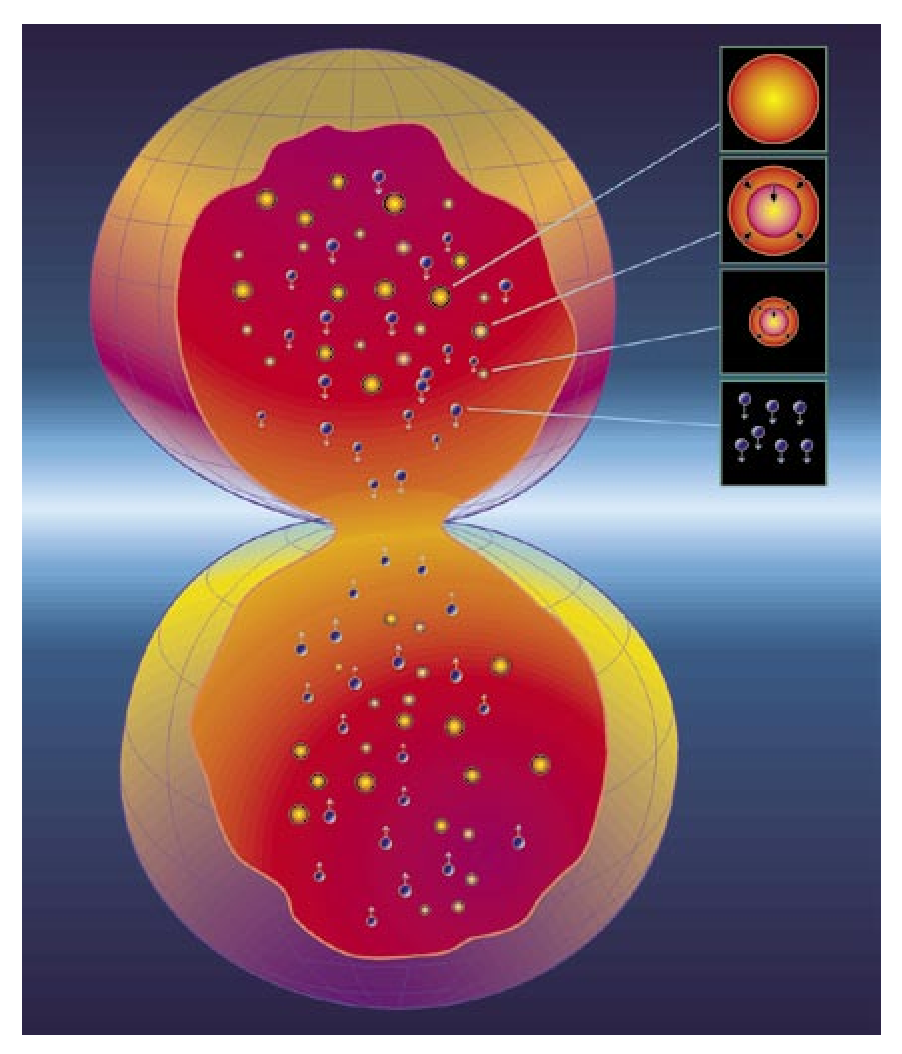
Las galaxias enanas no lo son tanto. Su bajo contenido de metales indica, en todo caso, que la actividad estelar se desarrolla en ellas sólo de vez en cuando, en grandes brotes estelares que están separados por largos intervalos de tiempo. En consecuencia, en el transcurso de larguísimos intervalos de inactividad, sólo una cantidad pequeña de elementos pesados, los procesados por la anterior generación estelar, podrán depositarse en el medio interestelar galáctico, incrementado ligeramente la metalicidad.

Los brotes nucleares de formación de estrellas que surgen en galaxias espirales culminan, por lo que a masa y energía se refiere, el rango de tales fenómenos espectaculares. La masa de brotes así nacidos excede por billones de veces la del Sol; son, por ende, los sucesos más luminosos de las galaxias. El número de estrellas masivas por brote es notable, suficiente para atribuirle varias explosiones de supernova por año. La energía asociada a la explosión local de supernovas domina sobre la actividad de la galaxia entera.

Se sabe que los brotes nucleares encierran una cantidad enorme de gas molecular. D. Sanders y F. Mirabel cifran en varios miles de millones de masas solares de hidrógeno molecular (H_2) las involucradas en el proceso. El disco de nuestra Vía Láctea, que ocupa un volumen de unos 75.000 años luz de radio, contiene una masa similar en hidrógeno molecular, esparcido por la galaxia.

Pero en las galaxias con brotes nucleares ese gas, y todo el que ya se ha transformado en estrellas, se encuentra en la región del núcleo, dentro de los tres mil años luz centrales del volumen galáctico. El impacto de tal formación estelar es devastador. Las frecuentes explosiones de supernova construyen una superburbuja, que excede las dimensiones de disco galáctico, con la rotura inevitable de la cáscara de material barrido, liberando así el material procesado lanzándolo hacia el halo de la galaxia.

Las velocidades alcanzadas por el material eyectado es de varios miles de kilómetros por segundo: superan la velocidad de escape de la galaxia. El gas lanzado termina creando plumas o chorros de gas, llamados supervientos galácticos; detectables sólo en rayos X, se extienden cientos de miles de años luz desde el núcleo galáctico que les dio forma.



8. DISPERSION DE METALES A GRAN ESCALA y su mezcla en el medio interestelar. Las explosiones de supernova de un brote lanzan el material procesado al medio interestelar. El material procesado, mal llamado metales en astronomía, donde metal es cualquier elemento más pesado que el helio, es termalizado (conversión de energía cinética en térmica) al cortar la onda de choque, generada en respuesta hidrodinámica del medio interestelar a la violenta explosión. En virtud de la temperatura alcanzada, el material eyectado se expande hasta ocupar la mayor parte del volumen barrido por la onda de choque principal. Esta, en su avance, aprisiona el material interestelar que encuentra a su paso. Las “superburbujas” que se crean pueden medir miles de años luz de diámetro. Las superburbujas, alimentadas por la energía liberada por las explosiones de supernova, continuarán creciendo hasta que explote la última estrella masiva del cúmulo. La estructura interna de las superburbujas empieza a irradiar energía enfriándose. Sus partes más densas radian más; por tanto se enfrían antes y, al enfriarse, se comprimen. El gas caliente que las rodea es menos denso y permanece a una presión más alta, con lo que también contribuye a comprimir las zonas más densas. El proceso lleva a una mayor densidad y ésta a un enfriamiento aún más rápido. Los metales comprimidos empezarán a caer originando una lluvia de elementos pesados sobre el disco galáctico. Las condensaciones metálicas conservarán su identidad hasta que la radiación ultravioleta producida por las estrellas masivas de una nueva generación de estrellas las deshaga.

En un principio se creyó que la hidrodinámica causada por los brotes nucleares sería idéntica a la instada para los brotes estelares de los brazos de galaxias, con las adaptaciones de escala obligadas. Pero hay otros factores; el más importante quizá, la caída de material en el núcleo. La introducción de ese parámetro en los cálculos está justificada por la necesidad de un transporte rápido y eficiente de una gran cantidad de material: el gas molecular y el trans-

formado en estrellas que se detectan en estas fuentes.

El flujo de material acumula gas en el núcleo, donde se dispara la formación de estrellas, y define el número de estrellas que han de constituirse para contrarrestarlo. Si el número de estrellas que se forman es insuficiente, las enterraría el material del disco que continúa cayendo sobre el núcleo y se "apagaría" el brote. De ocurrir eso tendrían que formarse más estrellas, hasta que la energética estelar conjunta, sumada a la liberada por vientos y explosiones de supernova, creciera y alejara el material incidente del disco.

En efecto, para que se equilibre el proceso, la energía producida por las estrellas debe ser similar a la energía cinética del material del disco que cae sobre el núcleo de la galaxia. En un marco de equilibrio, la superburbuja generada por la energética estelar podrá crecer hasta superar las dimensiones del disco galáctico y proceder a la rotura del cascarón en la dirección perpendicular al plano de la galaxia. A su vez, la energía estelar frenará la caída de material sobre el disco; el material se acumulará en la zona donde una y otra energía se igualen.

Alcanzado ese punto de convergencia, las dos ondas de choque —la que frena al material del disco y la que termaliza (convierte la energía cinética en térmica) el material lanzado por el brote estelar— mantienen una posición estacionaria. El material del disco, frenado y atrapado entre las dos ondas de choque, adquiere una gran presión y busca una salida, organizando un nuevo flujo perpendicular al plano de la galaxia, hacia regiones de menor presión. Lo mismo ocurre con el material supernóvico, rico en metales.

Una vez que la superburbuja excede las dimensiones del disco galáctico empieza a fluir con violencia, alejándose, rauda, del disco de la galaxia. El material del disco acumulado, al despegarse hacia regiones extradiscales y entrar en contacto con el material que fluye del brote, forma una estructura bicónica densa y muy filamentaria.

La estructura cónica se abastece con el nuevo material incidente, reconducido fuera del disco al pasar por la onda de choque estacionaria, inducida por la energía de la estrella. Mientras continúe el flujo de material del disco cayendo sobre el brote nuclear, se mantendrá una situación estacionaria. La estructura cónica resultante puede así alcanzar distancias de hasta 10.000 años luz fuera del disco galáctico; canaliza el material expulsado por el brote estelar, que fluye como un viento galáctico hasta las profundidades del espacio intergaláctico.

Los vientos galácticos contaminan el medio intergaláctico. Por centenares de miles se cuentan las estrellas que, en cada brote nuclear, explotan como supernova. Cada explosión lanza algunas masas solares de material procesado por la evolución estelar; por tanto, son varios millones de masas solares en metales las que se expulsan en estos supervientos, canalizados a través de los polos galácticos, hacia el medio intergaláctico.

Interesa conocer cuántos factores promueven la realimentación de la formación estelar y los que tienden a inhibirla. La gravitación, la agregación de macrocomplejos moleculares y la caída de material sobre el núcleo galáctico favorecen la generación de estrellas. Los vientos estelares, la fotoionización y las explosiones de supernovas, todas ellas manifestaciones de la energía estelar, causan la destrucción de las nubes moleculares y calientan al gas a temperaturas a las que resulta imposible el desplome gravitatorio y la consiguiente aparición de nuevas estrellas. Diríase que la formación estelar constituye un factor autorregulador. La autorregulación encierra, en efecto, la clave de nuevos descubrimientos. Clave que nos hará avanzar en el conocimiento del nacimiento, evolución, impacto y muerte de las estrellas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NUCLEAR STARBURST HYDRODYNAMICS. G. Tenorio Tagle y C. Muñoz Tuñón, en *Astrophysical Journal*, n.º 478, pág. 134, 1997.

THE BICONICAL KPC-STRUCTURE GENERATED BY NUCLEAR STARBURSTS. G. Tenorio Tagle y C. Muñoz Tuñón, en *Monthly Notices Royal Astronomical Society*, vol. 293, pag. 299; 1998.

A CATALOGUE OF DWARF GALAXY CANDIDATES AROUND INTERACTING GALAXIES. H. Deeg, C. Muñoz Tuñón, G. Tenorio Tagle, E. Telles, J. M. Vílchez, J. M. Rodríguez Espinosa, P. A. Duc e I. F. Mirabel en *Astronomy & Astrophysics*, Suppl. Series, 129, págs. 455; 1998.

EN CARRERA: datos de alta velocidad para los hogares

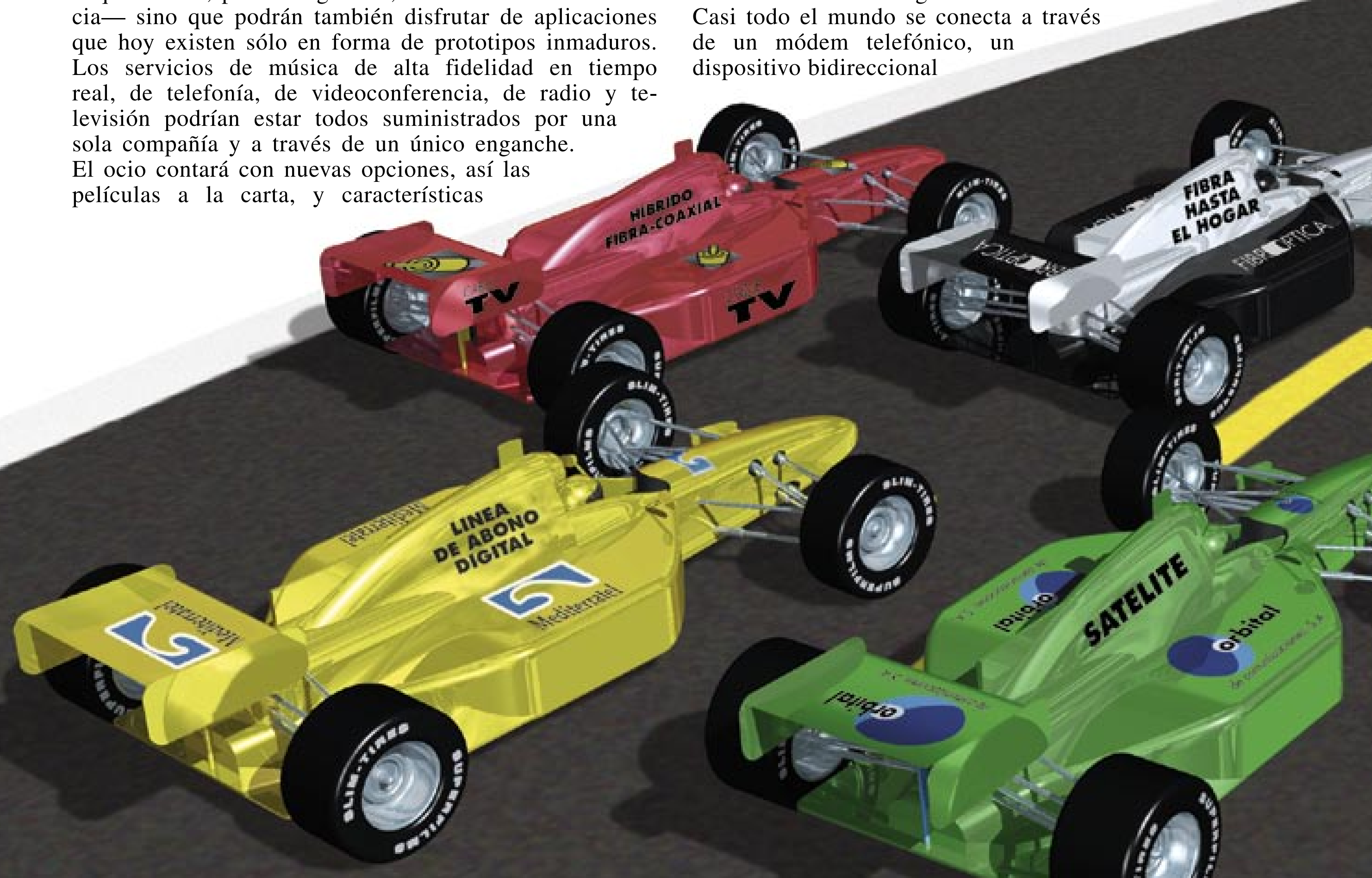
La red global está entrando en una etapa de su evolución que engendrará aplicaciones inéditas y hará de los módems telefónicos piezas de museo

David C. Clark

En un plazo de diez años, los habitantes de los países desarrollados podrán disponer de conexiones a Internet que serán decenas, cientos de veces más rápidas que las de uso común hoy. Tal vez no parezca un terremoto, pero sí anunciará un estadio totalmente nuevo en la evolución de esa red global.

Dichas conexiones de alta velocidad hasta los domicilios particulares —adopten la forma física de hilos telefónicos, de cable coaxial de televisión o de enlace por satélite— harán surgir un conjunto de aplicaciones inédito. No sólo los aficionados entusiastas podrán saltar instantáneamente de una página a otra de la Telaraña —que usarán, por consiguiente, con mucha más frecuencia— sino que podrán también disfrutar de aplicaciones que hoy existen sólo en forma de prototipos inmaduros. Los servicios de música de alta fidelidad en tiempo real, de telefonía, de videoconferencia, de radio y televisión podrían estar todos suministrados por una sola compañía y a través de un único enganche. El ocio contará con nuevas opciones, así las películas a la carta, y características nuevas, como la posibilidad de solicitar información sobre el director o los actores de una película mientras aparecen en la pantalla. Los usuarios podrán enfrentarse en juegos en línea —en directo— con muchos adversarios repartidos por todo el planeta. Personas separadas por miles de kilómetros podrán compartir experiencias de realidad virtual o colaborar en proyectos comerciales o académicos.

El veloz crecimiento de aplicaciones muy populares de Internet, como la World Wide Web, o Telaraña, está impulsando a la industria a construir la infraestructura necesaria para llevar hasta los hogares sistemas de comunicaciones de gran anchura de banda. Casi todo el mundo se conecta a través de un módem telefónico, un dispositivo bidireccional



capaz de convertir flujos de datos digitales en secuencias de tonos de frecuencia audible y recíprocamente, lo que consiente enviar datos binarios por líneas telefónicas, proyectadas en principio para la transmisión de la voz. En el otro extremo de la línea, un proveedor de servicios de Internet actúa como una especie de portal de acceso, a través del cual el suscriptor puede ponerse en contacto e intercambiar datos con un sinfín de nodos repartidos por el planeta.

Los módems telefónicos vienen ya instalados en la mayoría de los ordenadores. Pero ofrecen un rendimiento limitado. Además, la necesidad de efectuar —y abonar— una llamada telefónica para establecer conexión con el proveedor del servicio significa que el acceso a Internet no está disponible de forma continua y cómoda. En cuanto entren en servicio las técnicas de banda ancha será posible recibir y enviar por Internet textos, imágenes, sonido, o vídeo, y hacerlo sin apenas demoras. Internet siempre estará activa en diversas pantallas del hogar, lista para prestar servicio en cuanto se pulse una tecla o se dicte una orden. Las técnicas traerán consigo una pléyade de nuevos servicios de comunicación de datos, de multimedios y de televisión. Y harán todo esto a un precio aceptable.

Cablear el hogar

La diferencia de velocidad entre las distintas formas de conexión a servicios de telecomunicaciones es impresionante. Hoy los módems más rápidos de uso general reciben y transmiten datos a 56.000 bits por



1. EN CARRERA HACIA EL HOGAR: al menos cinco técnicas compiten para entregar información a velocidades enormemente más rápidas que las posibles hoy con los ubicuos módems telefónicos.

segundo (56 kilobits por segundo, o brevemente, kbps). Se trata del límite al que pueden conectar la mayoría de los ordenadores domésticos. En las oficinas, los ordenadores personales suelen hallarse conectados con otros de la compañía a través de una red local; la más utilizada, Ethernet, tiene una velocidad límite de unos 10 millones de bits por segundo (10 megabits por segundo, o Mbps) —unas 200 veces más rápida que el módem—. Pero a menos que la compañía disponga de una línea de alta velocidad "dedicada" al enlace con un PSI (proveedor de servicio Internet), la experiencia de sus empleados en lo tocante a Internet queda limitada al módem.

Algunas compañías disponen de enlaces de alta velocidad. Menos, los hogares y los pequeños negocios. Además, los usuarios no dejan conectado todo el día su ordenador y su módem al PSI; el costo de la utilización continua de la conexión telefónica sería prohibitivo. La discontinuidad de la conexión comporta una doble consecuencia. La primera, que cuando se quiere usar Internet hay que esperar a que el módem se conecte; en segundo lugar, no es posible sacar partido de aplicaciones como la recepción de llamadas telefónicas por Internet, pues no se puede entrar en contacto con el destinatario si éste no se encuentra conectado ya.

En última instancia, el deseo de disponer de comunicaciones de banda ancha para el hogar es consecuencia de la velocidad creciente de los ordenadores. Siguen éstos una senda de desarrollo que multiplica su rendimiento en un factor 10 cada cinco años. Tal avance permanente suscita aplicaciones no previstas. Hace nueve años, la Telaraña era poco más que una idea brillante. Empero, la velocidad creciente de los ordenadores no producirá aplicaciones de comunicación más rápidas si los usuarios continúan atascados tras un módem telefónico. Y 56 kbps es la máxima velocidad que estos dispositivos podrán alcanzar.

La variedad de líneas y cables tendidos hasta la mayor parte de los hogares constituye también una barrera para el funcionamiento en alta velocidad. Ninguno de estos enlaces fue proyectado para la transmisión de datos a velocidad alguna; no digamos para transmisiones extremadamente rápidas. Los pares telefónicos, de hilos de cobre, se instalaron para transmisión de voz; los cables coaxiales, para señales de televisión; y las gruesas líneas de potencia son, obviamente, para transportar energía eléctrica.

A pesar de todo, los ingenieros están ensayando varios métodos para llevar hasta los hogares canales de datos de alta velocidad. Se describen en este informe cinco de ellos. Los dos primeros utilizan técnicas muy sagaces para exprimir al máximo las líneas ya tendidas hasta el hogar; los sistemas híbridos de tipo fibra-coaxial se valen de la infraestructura de la industria de TV por cable, que cuenta con líneas de fibra óptica, además de las de cable coaxial; la línea de abono digital, mientras tanto, recurre a frecuencias mucho más altas que las utilizadas para transportar conversaciones, con el fin de enviar rápidamente datos por los pares telefónicos. El tercer método consiste en tender hasta los hogares un tipo de línea nuevo, un cable de fibra óptica. Existen varias configuraciones para este sistema, entre ellas, "fibra hasta la acera" y "fibra hasta el hogar", según lo cerca del domicilio que llegue la fibra.

Cabe prescindir por completo de alambres, cables y fibras. Las técnicas cuarta y quinta son inalámbricas, es decir, se basan en ondas electromagnéticas. Y hay, para cada una, un sistema similar en el reñido terreno de la telefonía móvil. Se ha pensado en diversas redes de satélites destinadas a una Internet de banda ancha, de funcionamiento similar al del sistema Iridium de satélites telefónicos, pues los orbitadores comunicarían directamente con el abonado. En el caso del sistema para Internet, el usuario accedería a los datos mediante una pequeña antena parabólica. El otro método, conocido por servicios de distribución local multipunto, se parece a las redes de telefonía celular móvil; utiliza ondas de radio para transmitir datos entre torres y antenas parabólicas instaladas en el domicilio.

No existe una métrica única y sencilla para comparar estas técnicas de banda ancha. Sería agradable poder ordenarlas por su velocidad relativa, por ejemplo, pero casi todas ellas son capaces de operar en un abanico de velocidades, dependiendo de cómo sean implantadas en la práctica.

Al considerar las características esenciales de cada una, podemos inferir las probables respuestas que pueden recibir cuestiones fundamentales del tenor siguiente: ¿Llegará alguna de estas técnicas a imponerse a las demás? ¿Competirán varias entre sí? ¿Será económicamente posible disponer pronto del servicio de banda ancha? La industria trabaja para zanjar estas cuestiones.

Una Internet fulgurante

Aunque la industria de la televisión por cable desarrolló su extensa red coaxial para ofrecer televisión, desde finales de los años ochenta fue reforzando la capacidad de sus equipos para que pudieran prestar, entre otros servicios, el acceso a Internet y el servicio telefónico. Los refuerzos consistieron en el tendido de líneas de fibra óptica desde puntos clave de distribución de señal hasta cubrir casi todo el camino hasta las zonas residenciales, usando después el cable coaxial original para distribuir la señal por los hogares de un barrio o de una parte de una ciudad. Al utilizar fibra óptica solamente donde más necesario era, las compañías de cable pudieron gastar mucho menos de lo que costaría reemplazar la red entera por líneas ópticas. Solución parcial que, no obstante, mejoró la calidad de la señal de televisión y posibilitó que la red soportase una doble vía de Internet y tráfico telefónico. Para acceder a Internet, el usuario ha de disponer de un módem de cable coaxial, un dispositivo que se conecta al cable exactamente igual que un convertidor de TV, pero que descodifica y manipula datos en lugar de señales de televisión.

La capacidad de un sistema híbrido fibra-coaxial (HFC) es considerable. Sólo uno de los muchos canales de televisión ofrecidos a los suscriptores puede transportar casi 30 Mbps hasta el hogar. Además, no se oponen cortapisas técnicas en la asignación de varios canales para Internet de banda ancha si la demanda generase ingresos suficientes, que justificasen el desplazamiento de otros canales de televisión.

En un sistema híbrido de tipo HFC, el canal de datos está compartido entre los hogares enlazados por coaxial hasta el extremo local de la línea de fibra óptica. Por tanto, la velocidad real de transmisión de datos depende del número de usuarios que compartan el canal en un momento dado. Pero un sistema bien diseñado puede disparar al usuario ráfagas de datos de Internet a velocidades que rondan los 10 Mbps. Hay también un canal de velocidad más baja que lleva en dirección contraria, para transportar un retorno de datos desde el domicilio hasta Internet.

De la central telefónica al usuario

La industria telefónica ha desarrollado técnicas originales con la idea de transmitir datos a elevada velocidad por las líneas de pares de hilos de cobre, concebidas para la transmisión de voz. Desde hace años se dispone de la RDSI (Red digital de servicios integrados), que funciona a 64 o 128 kbps. Pero la complejidad de los sistemas de tarifación, más una introducción largamente demorada por problemas de reglamentación, ha hecho que en la actualidad la RDSI sólo supere marginalmente a los módems telefónicos más rápidos. Un servicio mucho más veloz, T1, nació para llevar a las empresas múltiples enlaces de voz; tiene capacidad para transportar datos a 1,544 Mbps; las pequeñas empresas y ciertos hogares han empezado a utilizarlo para el acceso de datos. No obstante, las tarifas de T1 han venido siendo las de acceso profesional de voz, que es mucho más costosa, muy por encima de lo que el común de las gentes puede pagar por el acceso a datos.

La técnica telefónica más prometedora es la línea de abono digital (DSL, el inglés "digital subscriber line"). Aunque funciona a través del tendido telefónico, consigue tasas de transferencia más elevadas con sistemas electrónicos de nuevo cuño en los extremos de la línea. El par trenzado que sale de los hogares corre hasta un edificio no muy distante, la central local, desde donde se conecta a una centralita de conmutación. Las centrales son equipos complejos que encaminan las llamadas hacia otras centrales o hacia otros teléfonos, según sea necesario. En su mayoría se proyectaron para la transmisión exclusiva de voz, carentes de opciones especiales para el manejo de datos de alta velocidad. Si los módems telefónicos funcionan es porque sus diseñadores se tomaron enormes molestias en crear para los datos sistemas especiales de codificación, para que las centrales existentes pudieran manejarlos.

La DSL, mucho más rápida, no utiliza los equipos de conmutación existentes. En la oficina central se instalan conmutadores de nuevo tipo para explotar la capacidad de transporte de datos del par trenzado, que las llamadas telefónicas normales no pueden utilizar. La DSL emplea también sistemas refinados que codifican los datos en una banda de frecuencias mucho más ancha, y ocupa frecuencias mucho más elevadas que las reservadas para voz. Existen diversas variantes de la DSL, dependiendo de la distancia del domicilio a la oficina central. En la actualidad, el domicilio ha de estar a menos de 5 kilómetros de la central local para poder aplicar el sistema. Predomina una versión, la línea asimétrica de abono digital, cuya sigla en inglés es ADSL ("assymetric digital subscriber line"). Es capaz de entregar de 3 a 4 Mbps en los domicilios, y de transmitir desde el domicilio a ritmo más lento, normalmente, de una fracción de megabit por segundo.

Las líneas de fibra óptica presentan numerosas ventajas sobre los pares de cobre o los cables coaxiales. Una principal: la fibra puede transmitir datos a una velocidad de millones de megabits por segundo. Debidamente optimizada, una sola fibra óptica podría transportar todas las llamadas telefónicas que se estuvieran haciendo en cualquier instante en los Estados Unidos. Se cuentan por centenares, o millares, los tendidos de fibra que cubren el país, verdadera columna vertebral de las redes de telefonía, televisión por cable e Internet.

Para enviar las señales se utiliza una luz láser que es transmitida por la fibra. Merced a las propiedades ópticas de la fibra, la luz sigue las idas y venidas del filamento que la guía, y puede salir por el otro extremo de esa hebra, donde se detecta. Se enciende y apaga el láser a un ritmo de miles de millones de veces por segundo, generando una ristra de pulsos luminosos correspondientes a bits, que son enviados por la fibra, y devueltos a la forma de señales eléctricas en el extremo receptor.

Lo mismo que con cualquier tipo de infraestructura, la instalación de una red que enlace con muchas viviendas resulta harto cara. Una forma de reducir costes consiste en utilizar una fibra para atender a un núcleo de residencias, en vez de llevar una fibra independiente hasta cada casa. Este sistema más económico, que ofrece una relación costo/rendimiento bastante buena, se conoce por "fibra hasta la acera". Una fibra llega desde una oficina central hasta una caja cercana a la acera, y desde ella, mediante cables coaxiales, o los pares trenzados tradicionales, son conectadas 10 o 15 viviendas.

¿Llegará LEO a lanzar su rugido?

De entre todos los servicios de banda ancha en trance de aflorar, el servicio basado en satélite es el más avanzado y el que mayores riesgos entraña, desde una doble perspectiva técnica y económica.

La mayoría de los satélites de comunicaciones son geosincrónicos. Están situados sobre la Tierra a la altitud justa y precisa para que orbiten con la velocidad angular del movimiento de rotación terrestre. Por ello, con respecto a un receptor situado en tierra, parecen ocupar un punto fijo en el cielo. Y en consecuencia, las antenas parabólicas de recepción de señales de TV pueden permanecer estáticas para seguir al satélite.

Pero los satélites geosincrónicos presentan varios inconvenientes. Se encuentran a gran altitud (unos 36.000 km), por lo que la ida y vuelta de la señal supone una demora que ronda un cuarto de segundo; tal demora degrada muchas formas de transmisión de datos. Tan gran distancia entraña también que el satélite ha de contar con un potente emisor, o de lo contrario, ha de transmitir datos a baja velocidad. Finalmente, la órbita geosincrónica tiene un espacio limitado y, en su mayor parte, está ocupada ya.

La próxima generación de satélites, presta para el despliegue, tendrá órbitas mucho más bajas. En lugar de parecer estacionarios, irán desfilando sobre nuestras cabezas. Situando en órbita un número suficiente, al menos uno se encontrará al alcance de cualquier punto dado. Estos satélites de órbita baja (LEO, del inglés "low-Earth-orbit") se hallarán en comunicación unos con otros. Así, una unidad remota en una vivienda puede hablar con otra unidad situada en cualquier lugar, enviando datos al satélite que en ese instante se encuentre sobre ella; éste trasladará el mensaje por el espacio hasta el satélite que se encuentre en ese momento al alcance de la segunda unidad remota.

Los sistemas LEO presentan muchas ventajas. Por ser inferior a los 2000 kilómetros su altitud orbital, los tiempos de propagación resultan muy cortos. Como los satélites pueden operar a diversas altitudes, caben muchas órbitas y pueden desplegarse muchos sistemas. La baja altitud de su órbita exige potencias de emisión de radio inferiores, por lo que a la vivienda le basta con una antena pequeña.

El costo de despliegue e instalación de un sistema LEO sería muy elevado, pues requeriría una flota de

decenas de satélites. Y está por demostrar que la demanda llegue a justificar el costo. No obstante, ya están en servicio sistemas LEO de transmisión de voz, como la configuración Iridium de Motorola, y varias compañías están proyectando sistemas de datos LEO cuyas tasas previstas de transmisión conjunta de datos lleguen a sumar hasta un gigabit por segundo.

Sistemas inalámbricos sobre Terra Firma

El servicio de banda ancha puede tener base terrestre e inalámbrica. De hecho, éstas son las características distintivas de un conjunto de técnicas que se van explorando con miras al mercado. Aquí nos ceñimos a una opción concreta, los servicios de distribución local multipunto (LMDS, del inglés "local multipoint distribution services"), que está recibiendo muchísima atención de los proveedores de acceso. Los sistemas LMDS utilizan una señal de altísima frecuencia (28 gigahertz).

De acuerdo con la premisa fundamental en que se basan las redes inalámbricas, el componente principal del costo de instalación de cualquier sistema de banda ancha basado en cables o en fibras ópticas no es el cable propiamente dicho, sino la mano de obra necesaria. Se ha de rehuir, por tanto, la instalación de líneas fijas. En cambio, estas otras redes, como las de telefonía móvil, emplean enlaces radioeléctricos desde la antena de una estación base hasta las unidades remotas instaladas en los domicilios.

Los ingenieros están desarrollando diversas configuraciones, categorizadas en razón de la distancia entre estaciones base, la velocidad de transmisión de datos y el carácter (móvil o no) de las unidades remotas. A diferencia de la telefonía móvil, los usuarios de Internet permanecen estáticos, lo que simplifica mucho el sistema.

Uno de estos sistemas inalámbricos para datos está diseñado para utilizar las torres de telefonía móvil ya existentes. Debe, pues, operar utilizando el espaciamiento intertorres de tales servicios. Por ahora, estos sistemas ofrecen sólo velocidades de transmisión bastante módicas (de 10 a 50 kbps), y son comercializadas para usuarios móviles, no para el acceso desde los hogares. Ello no obsta para que la industria de telefonía móvil se proponga realizar un uso más agresivo de sus torres y explotarlas para desplegar servicios con tasas de transmisión a las viviendas de hasta 1 Mbps. Se espera que el sistema pueda venderse dentro de un par de años.

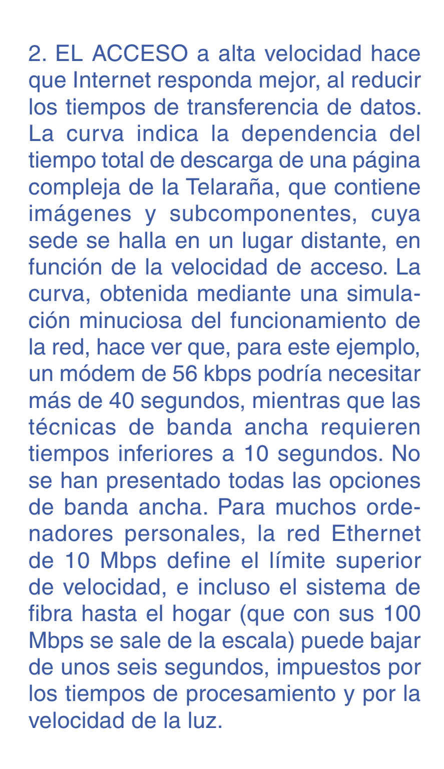
Otros sistemas inalámbricos se basan en estaciones base más próximas. Se instalarían antenas menores en lo alto de los postes telefónicos, o incluso entre postes, suspendidas de cables. Tales sistemas, aunque más costosos de instalar porque exigirían mayor número de estaciones base, podrían ofrecer velocidades de transmisión más elevadas, al ser más cortos los enlaces inalámbricos.

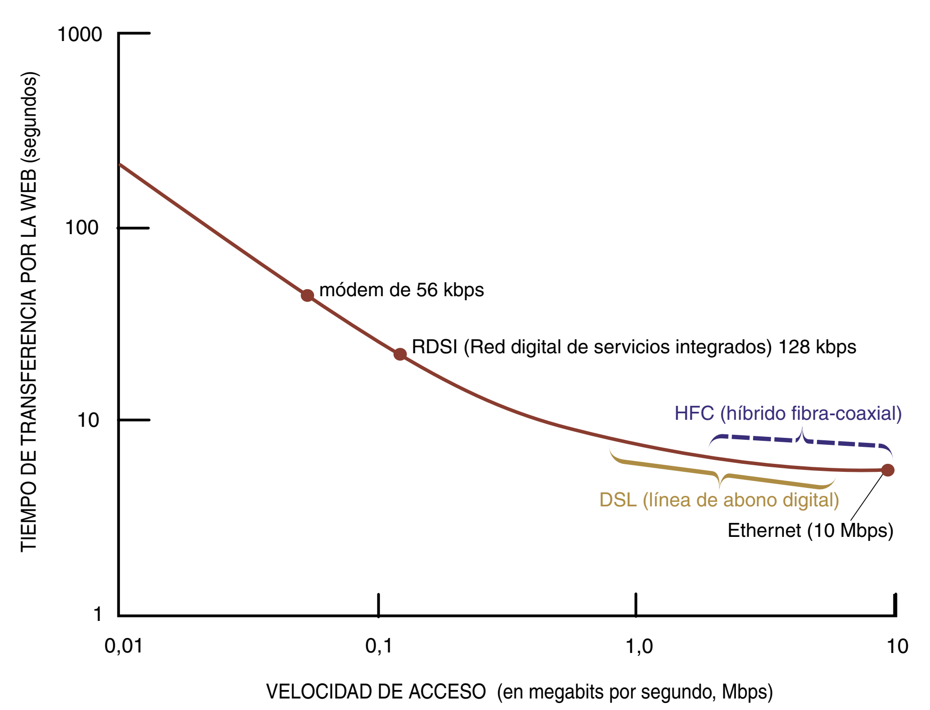
La muy alta frecuencia de LDMS impone ciertas limitaciones, porque las ondas de radio sólo viajan en línea recta, quedando bloqueadas por los edificios y otros obstáculos. Más problemática todavía resulta su incapacidad para atravesar la humedad, que les impide cruzar bien el follaje. Pero la gran anchura de banda asignada al sistema (1,3 GHz) da pie a la posible creación de servicios de alta velocidad hasta el hogar. Se asiste ahora a los primeros ensayos de sistemas LDMS, en los que participan alrededor de 10.000 suscriptores en los Estados Unidos.

¿A qué llamar rapidez?

Por las breves descripciones anteriores, resulta claro que los sistemas de banda ancha difieren entre sí en rendimiento y servicios. El sistema de ADSL, por ejemplo, no tiene capacidad para transportar televisión, circunscribiendo su idoneidad a voz y datos. Ciertas formas de "fibra hasta la acera" pueden dar servicio de televisión; otras, únicamente de voz. Los satélites desplegados están especializados en voz, datos o televisión.

Estos sistemas llevan cierto tiempo en servicio, por lo que el vertiginoso crecimiento de Internet ha impuesto


2. EL ACCESO a alta velocidad hace que Internet responda mejor, al reducir los tiempos de transferencia de datos. La curva indica la dependencia del tiempo total de descarga de una página compleja de la Telaraña, que contiene imágenes y subcomponentes, cuya sede se halla en un lugar distante, en función de la velocidad de acceso. La curva, obtenida mediante una simulación minuciosa del funcionamiento de la red, hace ver que, para este ejemplo, un módem de 56 kbps podría necesitar más de 40 segundos, mientras que las técnicas de banda ancha requieren tiempos inferiores a 10 segundos. No se han presentado todas las opciones de banda ancha. Para muchos ordenadores personales, la red Ethernet de 10 Mbps define el límite superior de velocidad, e incluso el sistema de fibra hasta el hogar (que con sus 100 Mbps se sale de la escala) puede bajar de unos seis segundos, impuestos por los tiempos de procesamiento y por la velocidad de la luz.



un nuevo conjunto de problemas de diseño. Una llamada telefónica exige una cantidad conocida de capacidad de la red, lo que permite idear un sistema de telefonía para un número esperado de conferencias. Análogamente, un sistema de televisión por cable está diseñado para transportar un número conocido de canales de televisión. Pero la velocidad del servicio de Internet puede variar amplísimamente. Por ello, en este momento, ingenieros de sistemas y empresarios tienen que evaluar por sí mismos cuánto estarán los usuarios dispuestos a pagar por ir más rápido.

Los ingenieros ignoran qué será lo que en el futuro demanden los usuarios. Hoy por hoy, la aplicación más popular de Internet es la Telaraña (la Web), que tiene un conjunto de exigencias de capacidad. Pero Internet puede dar cabida a toda clase de aplicaciones, cada una de las cuales comporta comunicaciones con diversos requisitos, y no está claro cuáles llegarán a ser populares durante la vida útil de un sistema que se instale hoy.

En vista del amplio abanico de sistemas y exigencias técnicas, resulta tentador especular cuál de las técnicas de banda ancha predominará. Pero las diferencias técnicas tienen una mínima influencia en el despliegue. Los sistemas son todos técnicamente factibles. Con todos se ha experimentado, excluidos los satélites LEO para enlaces de datos, y se han instalado en diverso grado. La auténtica barrera para el acceso generalizado a la banda ancha es el costo de la instalación. Como cabía imaginar, las decisiones sobre el despliegue están sometidas a razones económicas y de estructura empresarial.

Las estimaciones de la industria sugieren que el costo para recablear de nuevo un vecindario para la banda ancha, dividiendo el costo de instalación a partes iguales entre todas las residencias, se cifra en torno a las 150.000 pesetas por hogar. Como en los Estados Unidos hay aproximadamente 100 millones de hogares, parece que quizás hubiera allí que invertir unos 100 millardos de dólares para suministrar una nueva conexión de banda ancha a todos los hogares del país. Se trata de una suma enorme, cuya justificación no está clara, por la razón de que la importancia de Internet (y del acceso a ella por banda ancha) está todavía a medio demostrar. Efectuar los tendidos bajo demanda, a razón de un hogar por vez, resulta todavía mucho más caro; ello significa que el cableado bajo demanda a consumidores aislados sería menos factible todavía.

Por estas razones, las compañías telefónicas y los operadores de cable están avanzando a través de mejoras incrementales, más económicas que el reemplazo total. En la actualidad, no puede sorprender que las compañías de televisión por cable estén vendiendo servicio de Internet de banda ancha basado en sus redes híbridas de fibra y de cable coaxial y en sus módems de cable coaxial. Mientras tanto, las compañías telefónicas están ofreciendo servicio de Internet de banda ancha basado en ADSL y sus ubicuas líneas de par trenzado. La eventual combinación de las técnicas de cable y DSL nada tendrá que ver con sus relativos méritos técnicos, y sí, por contra, con los niveles relativos de inversión y de mercadeo de estas dos fuerzas.

Son pocos los inversionistas dispuestos a aventurarse en la instalación nueva de cable, como el sistema de fibra hasta el hogar. Pero cuando es necesaria una nueva instalación, para atender, sea por caso, a una subdivisión, existen razones para instalar un sistema lo más moderno posible. Por ello podemos ver "fibra hasta la acera" en nuevas instalaciones, llevada, con gran probabilidad, por una compañía telefónica o de cable local. Curiosamente, es posible que los sistemas de fibra, sea hasta la acera o hasta el hogar, permitan a las compañías de luz entrar en el negocio de la transmisión de datos, en un momento en que, según muchos, se están desafiando con éxito sus monopolios en la generación de energía. Un recurso valioso cuya titularidad todavía poseen muchas compañías de suministro eléctrico es el derecho de paso, que son el recurso constituido, fundamentalmente, por los postes y tendidos que corren por las calles de los barrios y las vías principales de las ciudades. Sería francamente sencillo tender nuevas líneas de comunicaciones adosadas a los viejos cables de energía. Esta posibilidad hace hincapié en la idea de que convendría que cada una de las técnicas de tendido fuera ocupando un nicho económico, sin entrar a competir unas con otras en función de sus méritos técnicos.

A las compañías que deseen entrar en el negocio de la banda ancha, pero no posean ya tendidos hasta el hogar o derechos de paso, no les quedan más que los sistemas inalámbricos y los satélites. La erección de tales sistemas, especialmente en áreas municipales con elevadas densidades de población, es menos cara que la instalación de cables nuevos, pero aun así, muy onerosa.

Choque de titanes: el cable contra las telefónicas

Las técnicas de banda ancha no han llegado al mercado con la rapidez que algunos observadores habían esperado. La frustración que ha suscitado la lentitud de su despliegue ha llevado a especular que tal vez no exista una demanda real suficiente que justifique las grandes inversiones requeridas. El veloz crecimiento de Internet acelerará las cosas. Se había esperado que la liberalización de las telecomunicaciones animase a las telefónicas a ofrecer a las compañías de televisión y de cable la posibilidad de ofrecer servicios de telefonía, mejorando así la competencia en cada sector. En realidad, poco de eso ha ocurrido. Pero la enorme demanda de Internet, de la que pueden encargarse por igual las dos industrias, está incitándolas a entrar en colisión por vez primera

La industria que más invierta en infraestructura podría muy bien quedarse con la parte del león del mercado de banda ancha. Por el momento, las compañías de cable, con su técnica híbrida de fibra óptica y cable coaxial, tienen la mayor participación. Pero las compañías telefónicas poseen el capital —y ahora, con DSL, también la técnica— para hacerse hueco en el mercado, y están empezando a hacerlo. Es demasiado pronto para decir si los sistemas inalámbricos o de satélite supondrán un desafío importante para el cable y la DSL, mientras que los sistemas de fibra hasta el hogar parecen destinados a ser una propuesta prohibitivamente cara, al menos, a corto plazo.

A la larga, el consumidor recibirá mejor servicio si todos tienen éxito, lo que suscitará más vigorosa competencia y más opciones para elegir. De hecho, uno de los puntos más fuertes de Internet es que puede operar con cualquiera de estas técnicas. Felizmente, no es necesario que haya una única vencedora para llevarnos al nuevo estadio de evolución de Internet, con independencia de la forma específica que ese estadio adopte.

Internet por cable

Milo Medin y Jay Rolls

Usar por primera vez los servicios de Internet vía cable puede constituir una experiencia sobrecogedora. Las imágenes y los textos vuelan instantáneamente ante nuestros ojos. Las películas y el sonido se reproducen sin estridencias. Eso era lo que se pretendía de Internet. Incluso para los veteranos de Internet, se abre un mundo nuevo.

La red de televisión por cable sale con ventaja en la carrera para proporcionar acceso de datos a alta velocidad, desde el hogar. El sistema, que cuenta, sólo en Norteamérica, con un millón largo de suscriptores al cable a través de módem ha madurado desde sus inicios en 1995, cuando no era más que una serie de instalaciones experimentales, convirtiéndose en un servicio común en la mayoría de las grandes ciudades.

El acceso a Internet por cable procede a una velocidad que centuplica la celeridad de las líneas telefónicas. Esta fuerza bruta es el catalizador responsable del inmenso cambio operado en los servicios típicos de Internet. Y la conexión está "siempre encendida", lo que permite a los usuarios visitar un puesto en el momento en que deseen. Se acabaron los días en los que había que conectarse a la red. Las compañías telefónicas han comenzado a introducir sus propios servicios de alta velocidad, pero hasta el momento su oferta es bastante más lenta que el cable y, en la mayoría de los casos, más cara.

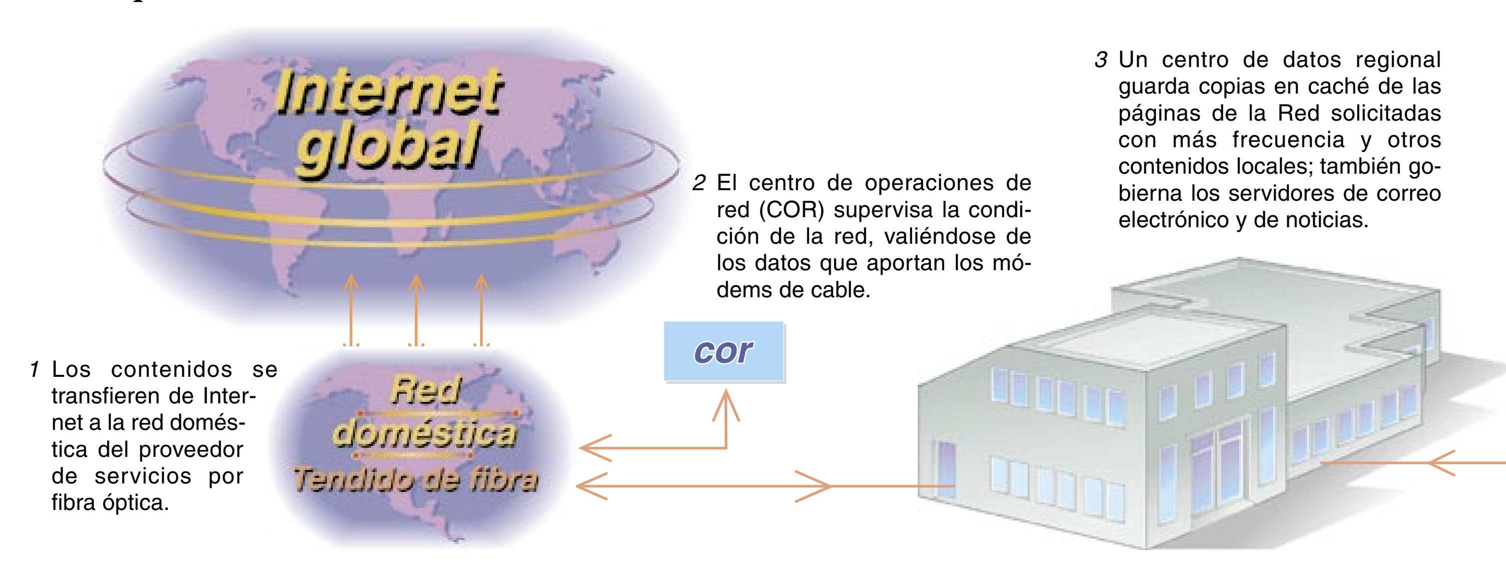
¿Cómo logra el cable estas tasas de transmisión? A finales de los ochenta y principios de los noventa los operadores de cable iniciaron la instalación de fibra óptica en sus redes. Las compañías de cable tendieron fibras hasta cada barriada y aprovecharon la infraestructura de cable coaxial (esa toma que se conecta al televisor o al reproductor de vídeo) para cubrir "el último kilómetro" hasta el hogar. Las fibras ópticas conectan las plantas centrales del operador de cable (la "cabecera") con cada barriada (el "nodo"), que suele cubrir un millar de hogares, usuarios potenciales todos ellos.

La fibra ha multiplicado la capacidad y la fiabilidad de las redes de televisión por cable. Con una conexión por cable a Internet, los datos ocupan el espacio de un canal de televisión. Sintonice ese canal y sólo verá "nieve", pero conéctelo a su módem de cable y se convertirá en un torrente de datos que fluyen a unos 40 megabits por segundo (Mbps), que se pueden transmitir a un ordenador personal a una cadencia de hasta 10 Mbps. La red de fibra permite también devolver señales desde el hogar hacia la cabecera, posibilitando los servicios interactivos de vídeo y de teléfono. Aproximadamente la mitad de los hogares norteamericanos a los que llega el cable disponen de esta capacidad de funcionar en ambos sentidos; en Europa y Japón son menos.

Más que un módem

Un módem de cable puede conectarse a más de un PC del hogar, un excelente apoyo a las redes domésticas. Estas redes, junto con la conexión permanente que caracteriza al servicio, fomentarán la proliferación de electrodomésticos "inteligentes", como hornos de microondas que leen un código de barras y eligen el programa de cocción adecuado de una base de datos

Arquitectura de una red híbrida fibra-coaxial



1 Los contenidos se transfieren de Internet a la red doméstica del proveedor de servicios por fibra óptica.

2 El centro de operaciones de red (COR) supervisa la condición de la red, valiéndose de los datos que aportan los módems de cable.

3 Un centro de datos regional guarda copias en caché de las páginas de la Red solicitadas con más frecuencia y otros contenidos locales; también gobierna los servidores de correo electrónico y de noticias.

Sólo las redes por cable se encuentran capacitadas para ofrecer servicios híbridos de televisión e Internet, así como el acceso rápido a la red

de Internet o de una pantalla sensible al tacto en la cocina (que a lo mejor vendrá insertada en la puerta de la nevera), que pondrán abundante información al alcance de la mano.

Los módems de cable emplean diversas técnicas avanzadas para llevar a cabo su tarea. De hecho, el nombre "módem de cable" no es muy afortunado, porque desempeña varias tareas más: dirige el tráfico, cifra la comunicación por mor de seguridad, verifica las señales y sintoniza el canal adecuado.

Como el cable coaxial lo comparte todo el vecindario, los módems deben repartir equitativamente el ancho de banda entre los usuarios, para asegurar que uno solo no monopolice todo el ancho de banda disponible. Conforme crece el número de usuarios, los operadores de cable achican las demarcaciones del servicio para mantener un ancho de banda adecuado. Todos los datos transmitidos por la red de cable están codificados para preservar la intimidad; cada módem posee su clave criptográfica propia.

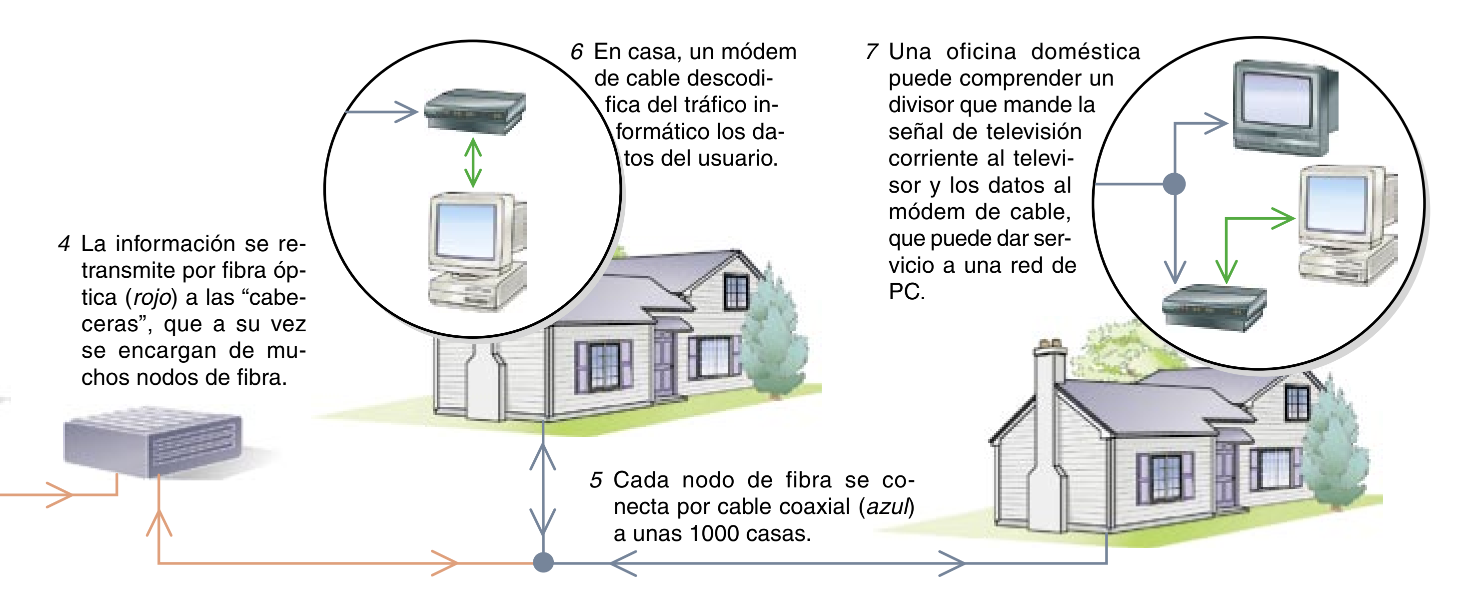
Los módems proporcionan cumplida información sobre la situación de la red a los proveedores de servicios de banda ancha, como es Excite@Home. Si de actualizar los programas informáticos para los módems se trata, podemos contar con una coordinación central; las anomalías del servicio pueden resolverse sin intervención humana. Una advertencia a tiempo emitida por el módem permite que el proveedor reaccione antes de que los problemas lleguen a afectar al servicio.

Un elemento importante para comunicar una sensación de banda ancha de alta calidad es un sistema de caché. A este respecto, Excite@Home almacena copias de los contenidos de Internet solicitados más asiduamente en servidores locales próximos a los suscriptores. Las copias locales pueden obtenerse sin necesidad de recorrer todo el camino hasta el destino final, acelerándose el acceso a las páginas de la Red.

Los módems por cable permitirán una gran diversidad de servicios. El acceso a Internet a alta velocidad es quizás el uso más obvio para los módems de cable, pero empiezan a aparecer aplicaciones de segunda generación que habrán de afectar a muchos servicios a domicilio tradicionales. Los fabricantes de las arquetas de transmisiones con las que se conectan los televisores a la mayoría de las redes de cable emplean la misma técnica para el transporte de datos hacia y desde el televisor. Navegar por la Red o leer el correo electrónico en el televisor será tan normal como hacerlo en el PC.

Pero lo que entusiasma por igual a los magnates de la televisión y a los anunciantes es la integración de la televisión con Internet, permitiendo que los suscriptores pasen de una a otra sin traba alguna. Por ejemplo, mientras uno ve su programa de televisión favorito, se podría abrir una ventana en la pantalla para conectarse a una tertulia en red y conversar con otros espectadores. O para recabar información sobre el director y los actores de una película que estemos viendo. Quizá tenga más atractivo para las empresas la posibilidad de que el anunciante ofrezca la compra de la mercancía con sólo seleccionarla en la misma pantalla. Dado que virtualmente todos los hogares poseen un televisor, en tanto que los PC no están tan extendidos, un sistema así constituido en torno a la televisión expande la audiencia potencial de estos servicios. Sólo la red por cable está en condiciones de ofrecer esos servicios híbridos.

A medida que los operadores de cable van superando los retos técnicos, la atención se centra en la puesta en práctica: implantación, servicio y comercialización. Los ejecutivos del cable están transformando a toda prisa sus compañías para convertirlas en empresas de telecomunicaciones hechas y derechas. Y pronto las imágenes, el sonido y los datos de todo el orbe nos llegarán a tal velocidad, que nos daremos cuenta de la diferencia entre eso y la red de televisión por cable que conocieron nuestros padres.



DSL: banda ancha por teléfono

George T. Hawley

¿Tendrá la humilde línea telefónica, técnica que transformó el mundo nacida en la era victoriana, un protagonismo destacado en la configuración del tercer milenio? ¿Puede un simple par de filamentos de cobre trenzados entre sí transmitir con plena fiabilidad los datos de Internet a una velocidad de vértigo, permitiendo que se vean imágenes de alta fidelidad en movimiento, sonido y enormes cantidades de datos en la pantalla del ordenador personal o de la televisión? La respuesta es afirmativa, como demuestra el éxito creciente de las líneas digitales por suscripción (DSL, de las iniciales en inglés).

Esos hilos de cobre, instalados en más de 600 millones de líneas telefónicas a lo largo y ancho del mundo, proporcionan servicios de voz de alta calidad, pero durante más de un siglo buena parte de sus capacidades de transmisión han permanecido en letargo. La técnica DSL aprovecha este recurso, aportando una velocidad 50 veces mayor a millones de usuarios de módem, acelerando el crecimiento del comercio electrónico y trastocando la naturaleza de las comunicaciones.

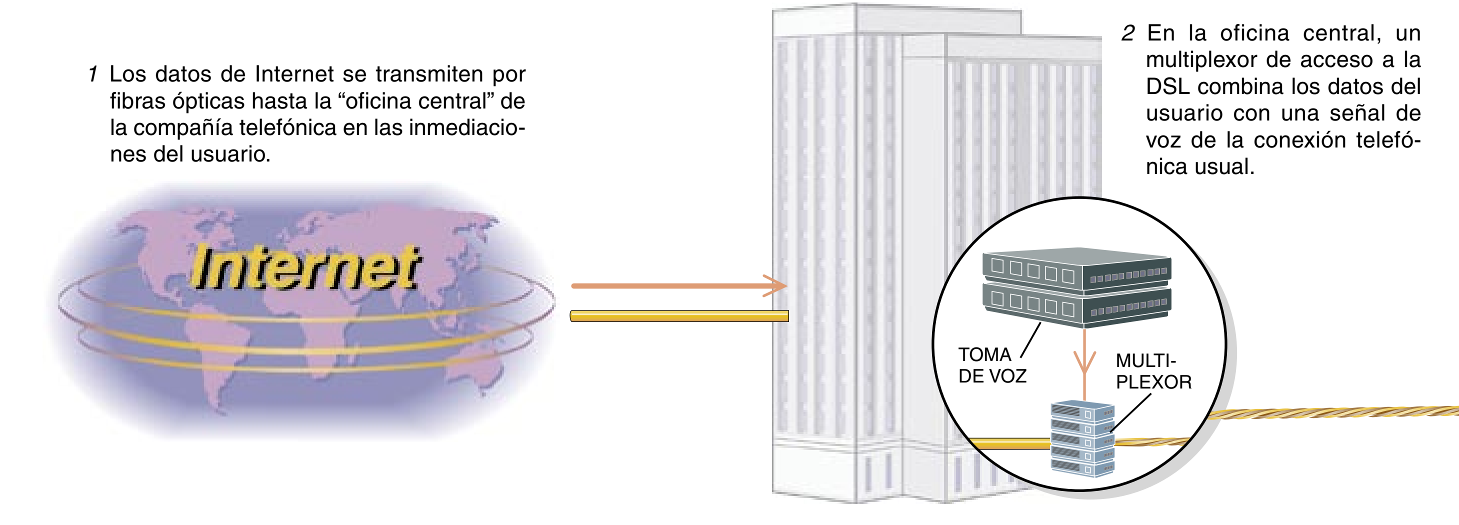
Subir el límite de velocidad

La capacidad de un canal de comunicaciones depende de un ancho de banda (la gama de frecuencias que usa) y su relación señal-ruido (que depende de la calidad de la conexión). Una vez fijados estos parámetros, resulta físicamente imposible exceder el límite fundamental que estableció Claude E. Shannon en 1948. Una conexión de voz a través de una red telefónica común emplea un ancho de banda de unos 3000 hertz: desde unos 300 Hz hasta los 3300 Hz. Un módem analógico que opere a 33,6 kilobits por segundo (kbps) requiere un ancho de banda ligeramente más amplio (3200 Hz) y necesita una conexión muy buena, que tenga una alta relación señal-ruido. La fórmula de Shannon indica que un módem así se encuentra muy cerca de la capacidad teórica del canal, sobre unos 35 kbps, una proeza sólo lograda tras 30 años de perfeccionamientos en los circuitos de módem. Los módems que funcionan a 56 kbps alcanzan esas tasas sacando partido de las ventajas de las conexiones digitales, que soslayan algunas fuentes de error en las transmisiones hacia el usuario final. (Siguen sujetos al límite de 33,6 kbps para las señales enviadas por el usuario final hacia el proveedor de servicio.)

Pero estas tasas de transmisión están lejos del máximo alcanzable en el mismo par trenzado. Un proceso que limita el ancho de banda y la potencia de la señal es la inexorable atenuación de la señal conforme viaja a lo largo de la línea, que afecta con más severidad a las altas frecuencias. Por tanto, se dispondría de mayor capacidad si la longitud de las líneas se mantuviera corta.

Joseph W. Lechleider propuso en los años ochenta utilizar una línea telefónica ordinaria como canal con muy elevado ancho de banda, en la corta distancia que media entre el usuario final y una oficina central de teléfonos. También propuso una codificación multinivel de la señal para alcanzar mayores prestaciones. Esta técnica de transmisión fue denominada línea digital por subscripción. A principios de los noventa, varias compañías, capitaneadas por PairGain Technologies (de California), habían desarrollado versiones de DSL de altas tasas de transmisión (HDSL) que podían transmitir casi 800 kbps a lo largo de una distancia de cuatro kilómetros.

Transmisión de datos y voz con gran ancho de banda por línea telefónica mediante ADSL



Los beneméritos cables de cobre de Alexander Graham Bell seguirán todavía prestando servicio en las comunicaciones de alta capacidad del tercer milenio

A la vez que el desarrollo del HDSL simétrico, John Cioffi inventó una técnica de codificación de la señal llamada Multitono Discreto, empleándola para enviar más de ocho millones de bits (“megabits”) por segundo a través de un par telefónico de más de 1,6 kilómetros de longitud. La técnica divide un ancho de banda total de aproximadamente 1 MHz en 256 subcanales de unos 4 kHz cada uno. Esencialmente, crea 256 módems virtuales en funcionamiento simultáneo por la misma línea.

La técnica de los multitonos discretos se ideó en un comienzo para enviar películas de entretenimiento por los cables telefónicos. Como este empleo demanda una transmisión en un solo sentido, la mayoría de los subcanales estaban destinados a la señal “de curso descendente” (en flujo hacia el consumidor) transportando unos 6 Mbps, con unos 0,6 Mbps disponibles en el otro sentido. Esta forma asimétrica de DSL ha dado en llamarse ADSL, y la codificación de la señal siguiendo esa norma es muy corriente en todo el mundo.

Aunque el servicio de películas no se ha implantado todavía, la transmisión asimétrica viene como anillo al dedo para navegar por la Red. Durante el pasado año el ADSL ha comenzado a instalarse en las líneas telefónicas para el acceso a Internet continuo, operando a varios cientos de kbps o más en los cables telefónicos de hasta unos 5,5 kilómetros de longitud. El atractivo del ADSL, del que carece la codificación multinivel empleada en el HDSL, es que los datos pueden emplear canales que funcionen por encima de la banda de frecuencia de la voz, de modo que una sola línea telefónica puede transmitir simultáneamente voz y datos a alta velocidad.

El futuro del ADSL para el gran público se encuentra en G.lite, una normativa mundial que limita las tasas de transmisión a 1,5 Mbps en curso descendente hacia el consumidor y unos 0,5 Mbps en el sentido inverso, ascendente. La limitación de velocidad permite que G.lite funcione con fiabilidad en más del 70 por ciento de las líneas telefónicas existentes y reduce el coste y el consumo energético. Ya están a la venta ordenadores domésticos que contienen circuitos preparados para G.lite.

El ADSL tiene diversas ventajas sobre los sistemas que emplean una red de televisión por cable. Con ADSL la señal de cada línea no se comparte con la de otros usuarios. Los módems por cable funcionan en lo que acaba siendo una gigantesca línea compartida: cuando alguien está recibiendo datos los demás no pueden hacerlo, lo que no obsta para que cualquiera pueda escuchar las señales de todos los demás, aunque sin la clave para descodificarlas, si están cifradas. Los cables telefónicos, por el contrario, son físicamente seguros.

Los tendidos de redes para ADSL transmiten señales combinadas para unos pocos centenares de consumidores a 155 Mbps e incluso más. Un canal de televisión tiene un caudal efectivo de sólo unos 24 Mbps, mermando su rendimiento con el empleo de cientos de módems por cable. El tráfico ADSL también se beneficia de la economía de escala; así, 1550 personas que compartan un tendido de 155 Mbps experimentarán mejores prestaciones que 240 en uno de 24 Mbps.

Además, para el uso eficiente de los módems por cable el operador debe invertir billones para poner a punto la red de cable con fibra óptica y equipos de transmisión en los dos sentidos; el ADSL, por el contrario, se vale del mismo tipo de par telefónico que Alexander Graham Bell empleó en el siglo XIX.

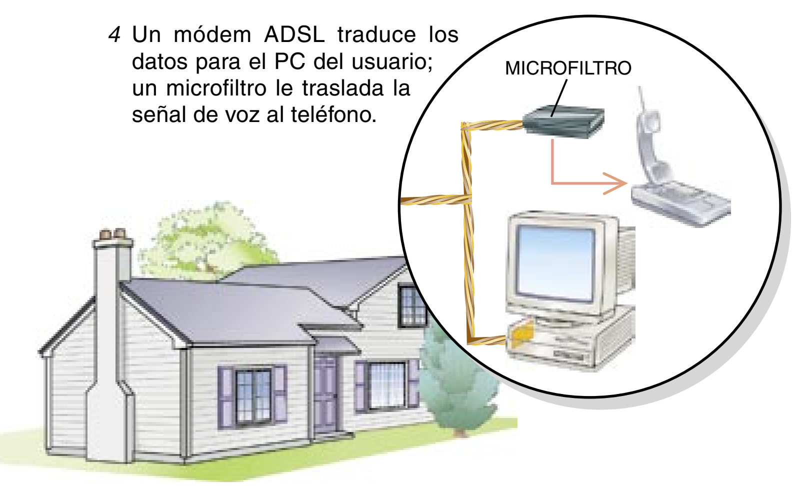
Los módems por cable le llevan una ventaja de un par de años a la DSL. No les bastará. Las predicciones indican que el número de usuarios de DSL sobrepasará a los de módem por cable dentro de un año, más o menos. A las viejas líneas telefónicas de cobre aún les queda mucha vida, y mucha capacidad.

Teorema de Shannon-Hartley

La capacidad de un canal de comunicaciones en bits por segundo viene dada por la fórmula

$$C = A \times \log_2 (s/r + 1)$$

donde A es ancho de banda de frecuencias del canal en hertz y s/r es la relación señal-ruido. Resulta físicamente imposible exceder este límite.



3 Los datos y la voz se envían a través de la misma línea telefónica ordinaria (un “par trenzado” de cobre) al usuario, hasta una distancia de cinco o seis kilómetros, en función de la calidad de la línea.

La más ancha de las bandas anchas

Paul W. Shumate, Jr.

La fibra óptica ha reemplazado a los cables metálicos en los tendidos primarios de casi todas las compañías telefónicas —locales y de larga distancia—, las operadoras de televisión por cable y las empresas proveedoras de servicios. ¿Por qué, pues, no prolongar las líneas de fibra óptica hasta los hogares de los usuarios? Con ello se eliminaría el cuello de botella del último kilómetro, que constriñe el acceso a Internet y a otros servicios. En los actuales sistemas de fibra doméstica, los clientes pueden descargar datos a velocidades de hasta 100 millones de bits por segundo (las futuras redes de fibra óptica superarán estas prestaciones), que decuplica de largo la celeridad de las transmisiones actuales por cable metálico. La capacidad de la fibra óptica es tal, que puede gestionar todo tipo de señales de comunicación simultáneamente; así, por la fibra que llega al usuario podría transmitirse el teléfono, la televisión, videoconferencias, películas a la carta, teletrabajo y tráfico de Internet.

Hasta hace poco, el principal obstáculo que se oponía a la implantación doméstica de la fibra residía en su precio prohibitivo. Es muy caro reservar una o dos líneas de fibra a cada consumidor, junto con la electrónica necesaria en cada extremo para transmitir y recibir las señales ópticas. La factura de la instalación completa asciende ahora a unas 250.000 pesetas, la mitad de cuya cifra se la lleva la electrónica; diez años atrás, importaba unas 750.000 pesetas, y sigue bajando con el avance de la técnica de la fibra. Pero es todavía más alta, en la mayoría de los casos, que el precio de conectar una casa equiparable con cable metálico.

Los tendidos de las redes principales están pródigamente multiplexados, esto es, una sola fibra de la red puede transmitir muchos canales independientes de señales. Por tanto, el precio por canal es barato. Compañías telefónicas y de televisión por cable sacan provecho de la pasmosa capacidad de la fibra instalándola en algunos de los tramos que se dirigen hacia las casas. En estos sistemas, con frecuencia denominados fibra hasta el nodo, fibra hasta la cabina o fibra hasta la acera, unas cuantas fibras conectan al proveedor de servicios con una casilla cercana a una barriada. La casilla contiene el equipo para convertir la señal óptica de la fibra en una señal eléctrica que pueda viajar a través de cables metálicos. Las conexiones metálicas hasta las casas varían en longitud, desde 30 metros escasos hasta poco más de un kilómetro. Estos sistemas resultan económicos porque se comparten el precio de la fibra y la electrónica entre todos los suscriptores del grupo, quizá varios centenares. Las tasas de transmisión, empero, son más bajas que si la fibra llega hasta el hogar, pues las conexiones metálicas del final actúan como cuellos de botella.

Redes de luz

En más de tres docenas de pruebas reales y de instalaciones por todo el mundo, la técnica de la fibra al hogar se ha aplicado con éxito. La primera vez que se empleó fue en Higashi-Ikoma (Japón) en 1977. Gracias a los progresos en arquitecturas y técnicas, empieza a resultar comercial. El primer cambio importante fue el desarrollo de la red óptica pasiva (ROP); en ésta se tiende una sola fibra desde un transceptor óptico ubicado en el emplazamiento del proveedor de servicios hasta un divisor óptico asentado en las inmediaciones de un

Una manera menos cara de llevar la fibra hasta el hogar

1 El proveedor de servicios codifica los datos en luz láser. Los datos para una comunidad formada por 16 a 32 casas se mandan por una fibra óptica hasta un divisor de potencia óptica ubicado en las inmediaciones.

2 El divisor de potencia óptica reparte equitativamente la señal de luz entre las fibras que llegan hasta los usuarios.

Nuevas técnicas auguran un menor coste para conectar los hogares con fibra óptica, el medio definitivo para la transmisión de datos

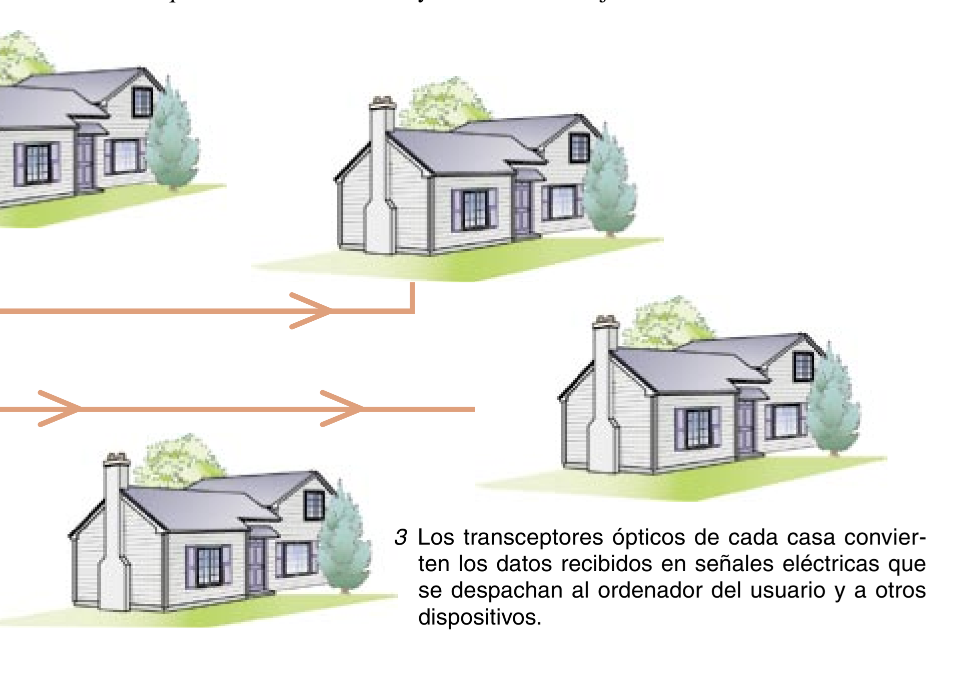
pequeño grupo de casas. El divisor reparte las señales de luz equitativamente entre 16 o 32 fibras de salida, que transmiten las señales hasta los hogares. En 1998 la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) normalizó las especificaciones de esas redes. Las ROP salen menos caras que otros sistemas anteriores de fibras al hogar porque no requieren la instalación de un transceptor óptico ni de una fibra exclusiva para cada usuario. Otros factores que abaratan la fibra hasta el hogar son los perfeccionamientos en los láseres, componentes ópticos, cables de fibra y circuitos digitales integrados diseñados para esta aplicación.

En la fibra la distancia importa menos que en los cables de cobre, porque las señales ópticas pierden muy poca potencia en su viaje. Las ROP funcionan igual en áreas rurales, donde las casas están separadas, que en los barrios hacinados de las ciudades. La conexión sí que implica un desembolso por el equipo y los costes de instalación que no se comparten totalmente entre los consumidores, tales como los gastos del tramo final de fibra desde el divisor hasta la casa y el de la terminal en el hogar donde tiene lugar la conversión de la señal óptica en eléctrica. Pero ya hay industriales que han pergeñado una estrategia para reducir su precio dentro de poco.

Se enfrentan estas redes ópticas ante un reto formidable, el de organizar el tráfico digital de modo que una sola fibra pueda acomodar simultáneamente diferentes tipos de señales. El sonido y el vídeo, por ejemplo, requieren velocidades de transmisión casi constantes, mientras que las transferencias de archivos y el correo electrónico pueden transmitirse en oleadas intermitentes. Se usan varias técnicas para empaquetar todas estas señales en el ancho de banda disponible. La red especificada por la UIT emplea el modo de transferencia asíncrono, proyectado para gestionar tal mezcla de datos de manera eficiente. Ethernet, protocolo más antiguo, tiene la ventaja de que se encuentran muy fácilmente tarjetas Ethernet baratas para instalar en los ordenadores personales. Con el multiplexado por división de frecuencias se crean muchos canales en una sola fibra modulando la luz a diferentes frecuencias para cada canal. Las ROP más avanzadas emplearán multiplexado por división de longitud de onda, que asigne una longitud de onda única, o sea, un color de la luz, a la señal de cada usuario. Por ahora, la mayoría de los dispositivos para multiplexar longitudes de ondas son caros, pero los precios descenderán sin tardanza, pues esta técnica suele emplearse en los tendidos de la red principal.

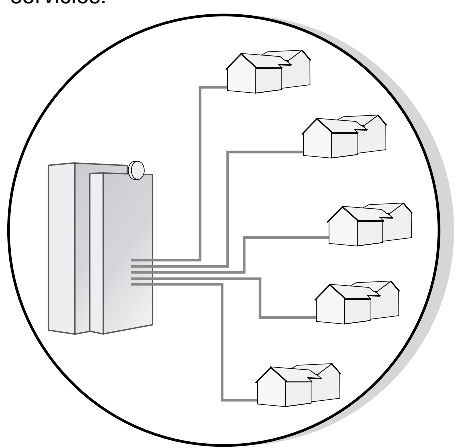
Aunque de las primeras pruebas de los años ochenta y principios de los noventa subsisten sistemas de fibras hasta el hogar, la industria de las telecomunicaciones opta por técnicas más recientes. Se han ensayado redes ópticas pasivas en Inglaterra, Francia, Bélgica, las Bermudas y Japón. BellSouth y NTT —la principal compañía de telecomunicaciones nipona— planean instalar productos que cumplen con la normativa de la UIT este mismo año. Hay sistemas de fibra multiplexada por división de frecuencia funcionando en comunidades rurales, que proveen de servicios telefónicos, televisión e Internet. En las áreas rurales la fibra al hogar parece resultar más económica que las redes convencionales, con independencia del tipo de multiplexado que se emplee.

Con la aparición de productos normalizados a precios razonables, muchos comercios están volviendo a ponderar las ventajas de la fibra hasta el hogar. Por descontado que la demanda de servicios digitales de alta velocidad va a crecer, lo que significa que los usuarios pedirán sistemas que puedan despachar aluviones de datos a bajo precio. Las fibras ópticas pueden transmitir más datos que cualquier otro medio del mercado, y el precio de conexión a los hogares está bajando con rapidez. En los años venideros se multiplicarán los usuarios decididos a introducir la fibra en su hogar. Por ello la opción de banda ancha es la más atractiva.



3 Los transceptores ópticos de cada casa convierten los datos recibidos en señales eléctricas que se despachan al ordenador del usuario y a otros dispositivos.

En otras disposiciones más antiguas y caras, se tendía una fibra óptica desde cada casa hasta la red óptica del proveedor de servicios.



Satélites: el campo de batalla estratégico

Robert P. Norcross

Quien desee adivinar el futuro de las comunicaciones de banda ancha, mire al cielo. Muy pronto el firmamento podría aparecer invadido por no menos de 400 satélites que ofrezcan a los usuarios de Internet unas conexiones, baratas y directas a domicilio, centenares de veces más rápidas que los actuales módems telefónicos. Con un campo que cubre sin obstáculos prácticamente todo el globo, los satélites están preparados para rendir servicios interactivos en banda ancha de una forma que hasta las redes terrestres más avanzadas se verían en graves dificultades para igualar.

Los satélites de la nueva generación actuarán cual potentes repetidores situados en el cielo, recibiendo y reenviando radiotransmisiones procedentes de antenas instaladas en tierra. De un costo muy inferior por capacidad unitaria que la mayoría de los satélites hoy en servicio, emplearán técnicas digitales de nuevo cuño que mejorarán la capacidad, la fiabilidad y la seguridad de las comunicaciones. Además, funcionarán a radiofrecuencias hiperaltas, lo que significa que harán uso de unos haces de radio estrechos capaces de comunicarse con antenas modestas, fácilmente instalables en las casas.

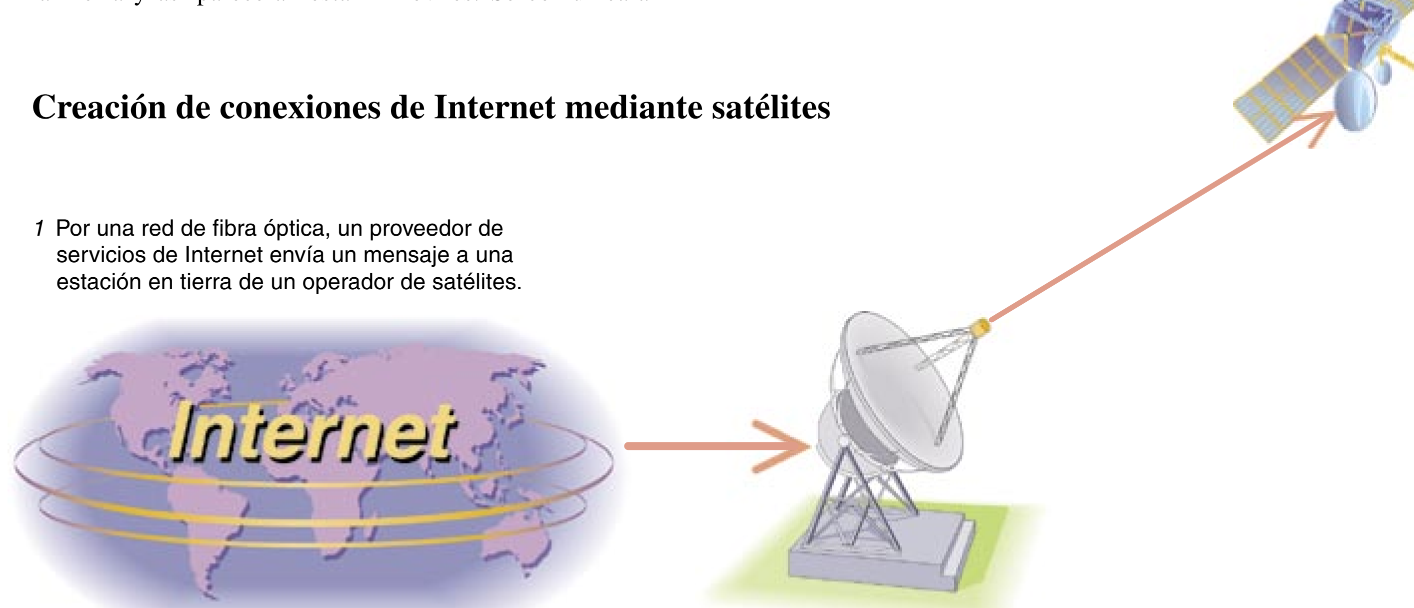
Sistemas de banda ancha por satélite

Se han propuesto dos sistemas por satélite. Los satélites geoestacionarios orbitarán a 36.000 kilómetros por encima del ecuador a la misma velocidad que rota la Tierra y así parecerán estar inmóviles. Se comunicarán con antenas de plato de orientación fija montadas en los domicilios y emplearán un procesado de señales avanzado para compensar los retardos en la transmisión debidos a las grandes distancias que deben recorrer sus radioseñales. Por contra, los satélites de órbita terrestre baja, o satélites LEO (“low-Earth orbit”), darán una vuelta al globo cada dos horas a unas alturas inferiores a los 1500 km, reduciendo el tiempo necesario para radiar señales desde y hacia la superficie terrestre. Sin embargo, requerirán unas antenas de usuario más complicadas capaces de seguir, y comunicarse con, los veloces satélites LEO.

Ambos tipos de satélites salvan la mayoría de las complicaciones que infestan las redes terrestres. Citemos algunas de sus ventajas:

Ubicuidad. El talón de Aquiles de la banda ancha estriba en las limitaciones técnicas de las redes terrestres, que restringen su disponibilidad. En las líneas de usuario digitales (DSL) las señales se amortiguan cuando la línea es larga o de mala calidad. En las líneas de los servicios de distribución multipunto locales (LMDS), las señales no pueden traspasar los árboles frondosos, los edificios u otros obstáculos. Las prestaciones de un cable se deterioran si, en un mismo vecindario, acceden a la vez demasiados hogares. En cuanto a las líneas domésticas de fibra, éstas resultan tan caras de reconvertir para ponerlas

Creación de conexiones de Internet mediante satélites



1 Por una red de fibra óptica, un proveedor de servicios de Internet envía un mensaje a una estación en tierra de un operador de satélites.

2 El mensaje, cifrado en una radioonda, se transmite a los satélites en órbita.

Los sistemas de comunicaciones que transmiten las señales a través de satélites ofrecen numerosas ventajas sobre los sistemas instalados en tierra

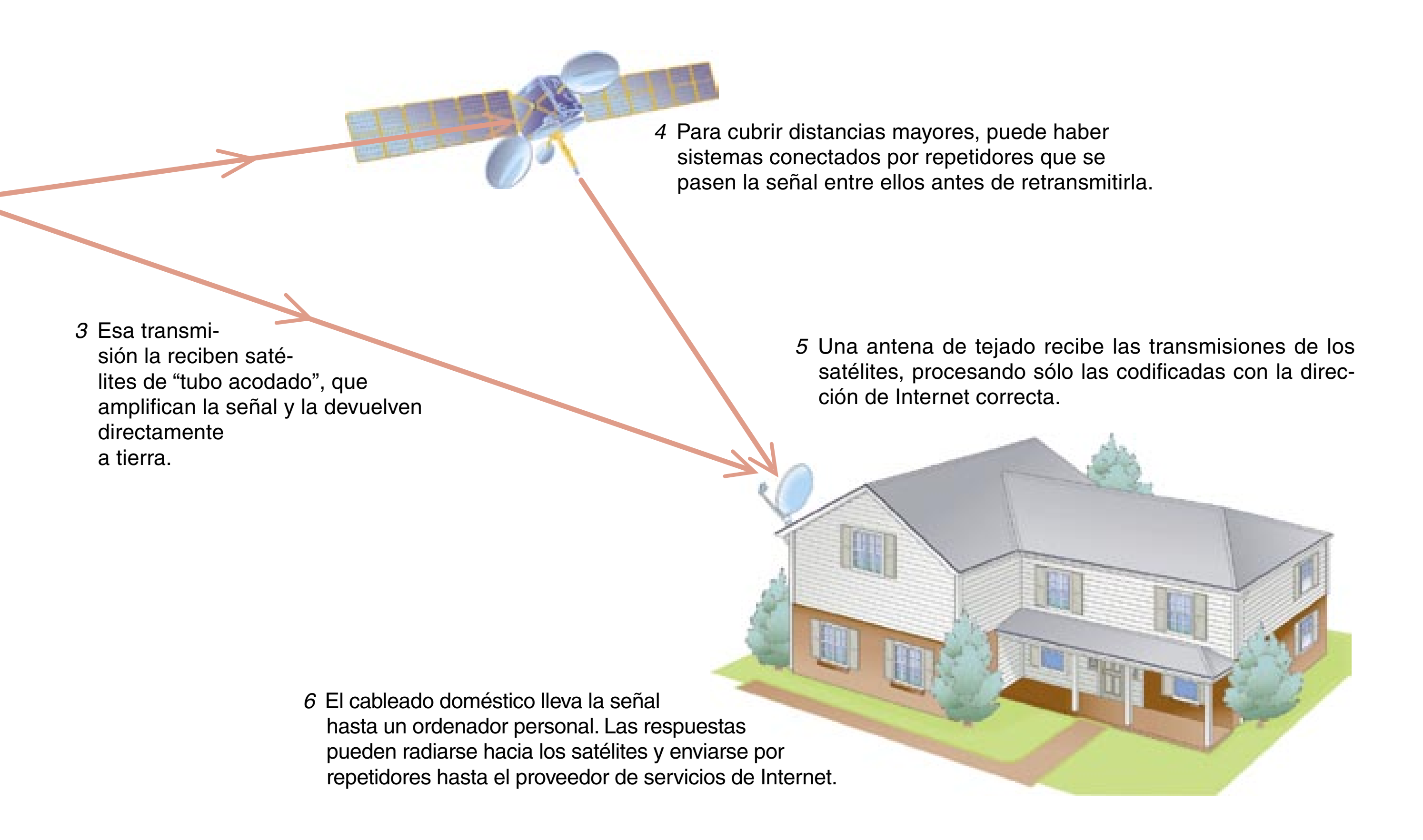
al día, que acostumbran considerarse viables sólo en el caso de edificaciones de nueva planta. Para la mayoría de la gente, la técnica por satélite no será *una* opción; será *la* opción.

Economía. Si los costos de los sistemas por satélite son astronómicos, sus posibilidades impresionan más. La capacidad combinada de los sistemas por satélite de banda ancha propuestos bastaría, en teoría, para manejar varias veces todas las comunicaciones por voz mundiales. Además, los satélites pueden asignar y repartir dinámicamente entre los usuarios su capacidad de transmisión para asegurar su disponibilidad donde y cuando se la necesita. Ello mejora el rendimiento de los satélites hasta el punto de que un sistema es capaz de admitir decenas de millones de suscriptores, lo que redunda en un menor costo del sistema por usuario.

Prestaciones. En la carrera de los bits-por-segundo, los satélites ganan a todas las demás opciones, salvo a los sistemas de fibra doméstica, harto más caros. Las encuestas revelan que los usuarios de la banda ancha valoran la velocidad de transmisión de datos por encima de otros atributos del servicio; además, su "necesidad de rapidez" se dobla de lejos cada año a medida que los sitios de la Telaraña Mundial se complican más y contienen más información. Para servir a esta incipiente demanda de descargas rápidas de Internet la posición de los satélites es perfecta, con unas velocidades de transmisión dobles que las del LMDS, de tres a seis veces más rápidas que los módems alámbricos y hasta 12 veces más rápidas que las DSL.

Diversidad competitiva. Aunque el debate sobre comunicaciones de banda ancha tiende a centrarse en cuestiones técnicas y económicas, el principal impulsor de los servicios por satélite podría radicar en las aspiraciones competitivas de las grandes empresas de telecomunicaciones. Ocurre que hay más compañías que proyectan comercializar servicios de banda ancha que redes terrestres disponibles. Las compañías de telecomunicaciones que no poseen y no pueden adquirir redes telefónicas o alámbricas en zonas donde desean operar tendrán que buscar otras opciones, y para servir esas necesidades los satélites no tienen rival.

Pese a tan evidentes ventajas, los satélites reciben escasa atención respecto a las opciones de banda ancha terrestres. Puede que ello refleje el malestar de la industria de las telecomunicaciones con las nuevas técnicas por satélite o una inclinación hacia las soluciones terrestres para sus necesidades futuras. No obstante, varias compañías están saliendo de la etapa de diseño y han anunciado planes para lanzar sistemas de satélites en el 2002, con unos servicios de Internet por banda ancha disponibles un año después. Con los análisis de mercado a la espera de que los satélites sirvan de un 15 a un 20 por ciento de los usuarios de la banda ancha, en el mercado habrá espacio suficiente para que varios sistemas compitan ofreciendo conexiones de Internet a través del firmamento.



Servicio de distribución multipunto local

John Skoro

A lo largo de los diez últimos años se han producido unas innovaciones fulminantes en el sector de las telecomunicaciones, presto a satisfacer la apetencia mundial por bandas cada vez más anchas. Varios hechos atizan ese crecimiento: la difusión de Internet, la dependencia de la información y la tendencia general hacia la liberalización de la industria.

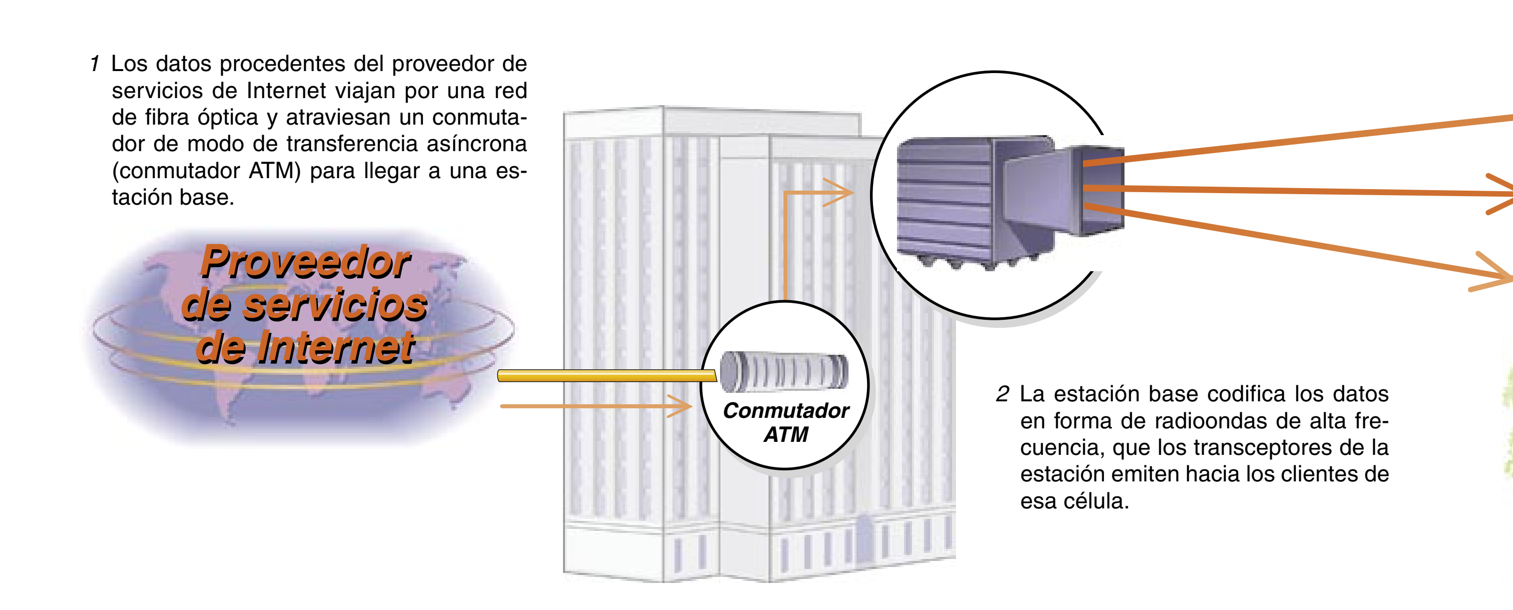
En ningún otro dominio se evidencia mejor el fenómeno que en la busca por mitigar los efectos de cuello de botella en los circuitos locales. Tal estrangulamiento se da donde las redes de área local, que enlazan dispositivos internos de un edificio o de un recinto universitario, se unen a las redes de área extensa, que se entrecruzan en los países y mantienen unida la Telaraña Mundial.

Los avances en la técnica de las fibras ópticas han ampliado la capacidad de las redes de área extensa hasta billones de bits por segundo. Mientras tanto, las redes de área local están evolucionando desde los 10 megabits por segundo (Mbps) hasta los gigabits por segundo. Las conexiones entre los dos ámbitos no han mantenido el ritmo, con la inmensa mayoría de los cables de cobre limitados aproximadamente a la velocidad de 1,5 Mbps de la línea T1. El usuario doméstico se enfrenta a un caso más extremo del mismo achaque, con unos datos que se arrastran entre el ordenador e Internet con una lentitud 30 veces mayor, a través de un módem y una línea telefónica que trabaja a sólo 56 kilobits por segundo (kbps).

De las múltiples técnicas desarrolladas para conseguir accesos inalámbricos de alta velocidad, el servicio de distribución multipunto local (LMDS) ofrece una manera ideal para romper el atasco local. Igual que las redes de teléfonos celulares, el LMDS es un sistema inalámbrico, aunque ideado para distribuir datos por radio a velocidades de hasta 155 Mbps (las llamadas de voz en los teléfonos celulares emplean 64 kbps, u 8 kbps en los sistemas digitales comprimidos). El LMDS podría ser la clave para suministrar datos multimedia a millones de usuarios de todo el mundo. Presta soporte a conexiones de voz, Internet, videoconferencias, juegos interactivos, discriminación de vídeo y otras aplicaciones de información a alta velocidad.

Una ventaja destacada de la técnica LMDS es que puede desplegarse en seguida y a un precio moderado. Los recién llegados al mercado que no disfruten del lujo de una red existente (de hilos de cobre o de fibra de operadores en actividad), pueden construir sin demora una red inalámbrica avanzada y comenzar a competir. Pero el LMDS es también atractivo para los operadores activos que necesiten complementar o ampliar redes existentes. Por ejemplo, los operadores que estén montando

Transmisión de datos en banda ancha mediante un sistema inalámbrico



Las redes inalámbricas terrestres que dan servicio en toda la banda ancha pueden desplegarse prontamente y sin grandes costes

un servicio basado en líneas de suscripción digitales y deseen ofrecer un servicio de acceso universal podrían emplear el LMDS para rellenar huecos en su cobertura. Mientras los módems por cable se están introduciendo en clínicas, hospitales, residencias y oficinas, el mercado comercial (donde no hay redes por cable, o muy pocas) pasa a constituir un auténtico nicho ecológico a disposición del LMDS.

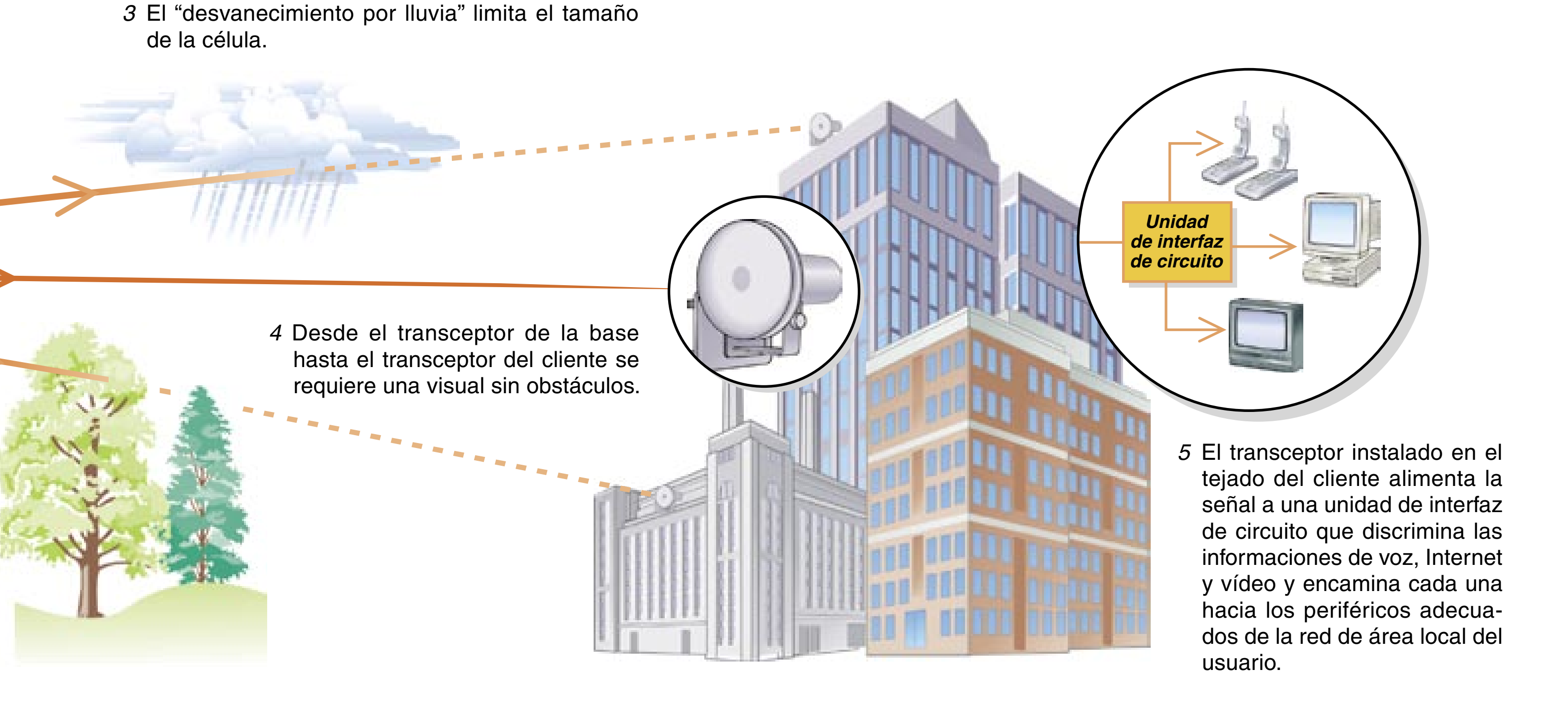
La mayor capacidad del LMDS se debe a que funciona en una amplia expansión, libre, del espectro electromagnético. En EE.UU., la Administración ha subastado entre los operadores de LMDS un ancho de banda total de 1,3 gigahertz (GHz) de la banda de ondas "milimétricas" en frecuencias de unos 28 GHz. En otros países, en función de cada legislación, los sistemas inalámbricos de banda ancha operan en algún punto entre 2 y 42 GHz. Los sistemas de teléfonos celulares digitales normales funcionan en torno a los 0,8 GHz con una asignación de ancho de banda típico de 30 MHz o menos.

Modo de operación

El envío de señales digitales de la complejidad requerida a 28 GHz ha sido posible merced a recientes mejoras en los costes y en las prestaciones de las técnicas de procesamiento de señales, sistemas de modulación avanzados y circuitos integrados de arseniuro de galio, más baratos y rentables, a esas altas frecuencias, que los microcircuitos de silicio.

El LMDS emplea células inalámbricas que cubren áreas de dos a cinco kilómetros de radio. A diferencia de un teléfono móvil, cuyo usuario puede mover de célula a célula, el transceptor de un cliente del LMDS está fijo y permanece dentro de una célula. Para conseguir una buena visual con el transceptor central suelen instalarse las antenas en los tejados.

El tamaño de la célula del LMDS está limitado por el "desvanecimiento por lluvia": distorsiones de la señal provocadas por gotas que dispersan y absorben las ondas milimétricas, a través del mismo proceso que opera en un horno de microondas. Además, los muros, los cerros y hasta los árboles frondosos reflejan y deforman la señal, creando importantes zonas de sombra para un transmisor. Por eso se ha propuesto servir cada célula desde varios transmisores para aumentar la cobertura; la mayoría dispondrá de un transmisor por célula, situados para acertar en tantos usuarios como sea posible. De valor para los operadores, en una industria con una gran rotación de clientes, es la capacidad de recoger el equipo y trasladarlo a otra ubicación, según dicte la economía del mercado; solución ésta imposible con los tendidos telefónicos y las redes de televisión por cable o de fibra óptica. Los sistemas de LMDS envían la información mediante una técnica llamada modo de transferencia asíncrona, que se usa ampliamente en las redes de área extensa y que permite entremezclar datos de tipos diversos. Así, un servicio de voz de alta calidad puede discurrir a lo largo de la misma corriente que Internet y aplicaciones de datos y vídeo. En resumen, el LMDS será una opción versátil y rentable para los proveedores y para los usuarios de servicios en banda ancha; a los primeros les ofrece rapidez y economía en su despliegue.



3 El "desvanecimiento por lluvia" limita el tamaño de la célula.

4 Desde el transceptor de la base hasta el transceptor del cliente se requiere una visual sin obstáculos.

5 El transceptor instalado en el tejado del cliente alimenta la señal a una unidad de interfaz de circuito que discrimina las informaciones de voz, Internet y vídeo y encamina cada una hacia los periféricos adecuados de la red de área local del usuario.

LUZ al extremo del canal

Una Internet mucho más rápida y fácil de utilizar estimulará la introducción de nuevos servicios, con las consiguientes transformaciones sociales

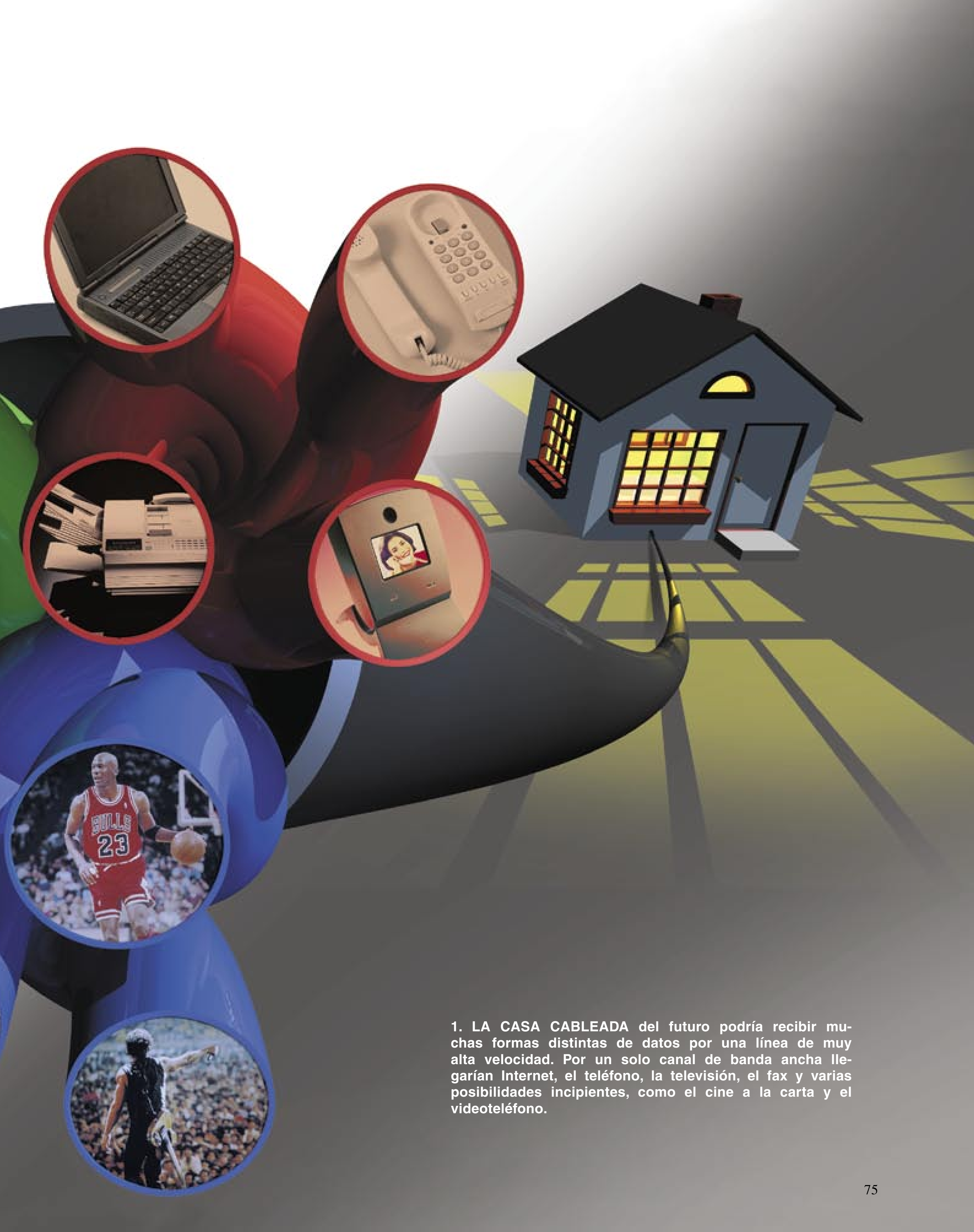
P. William Bane y Stephen P. Bradley

La escena global es harto conocida. Internet ha permitido intercambiar información digitalizada con rapidez, facilidad y conveniencia nunca antes igualadas. Pero no es tan evidente que el empleo de conexiones a velocidad mucho mayor nos aporte algo más que una nueva versión, más rápida, de Internet. En un futuro inmediato asistiremos a un cambio más radical, conforme vayan penetrando en Internet las técnicas de transmisión en banda ancha a gran velocidad. Las industrias de las comunicaciones, la información y el ocio convergerán, entonces, en un solo campo de actividades, de incesante expansión.

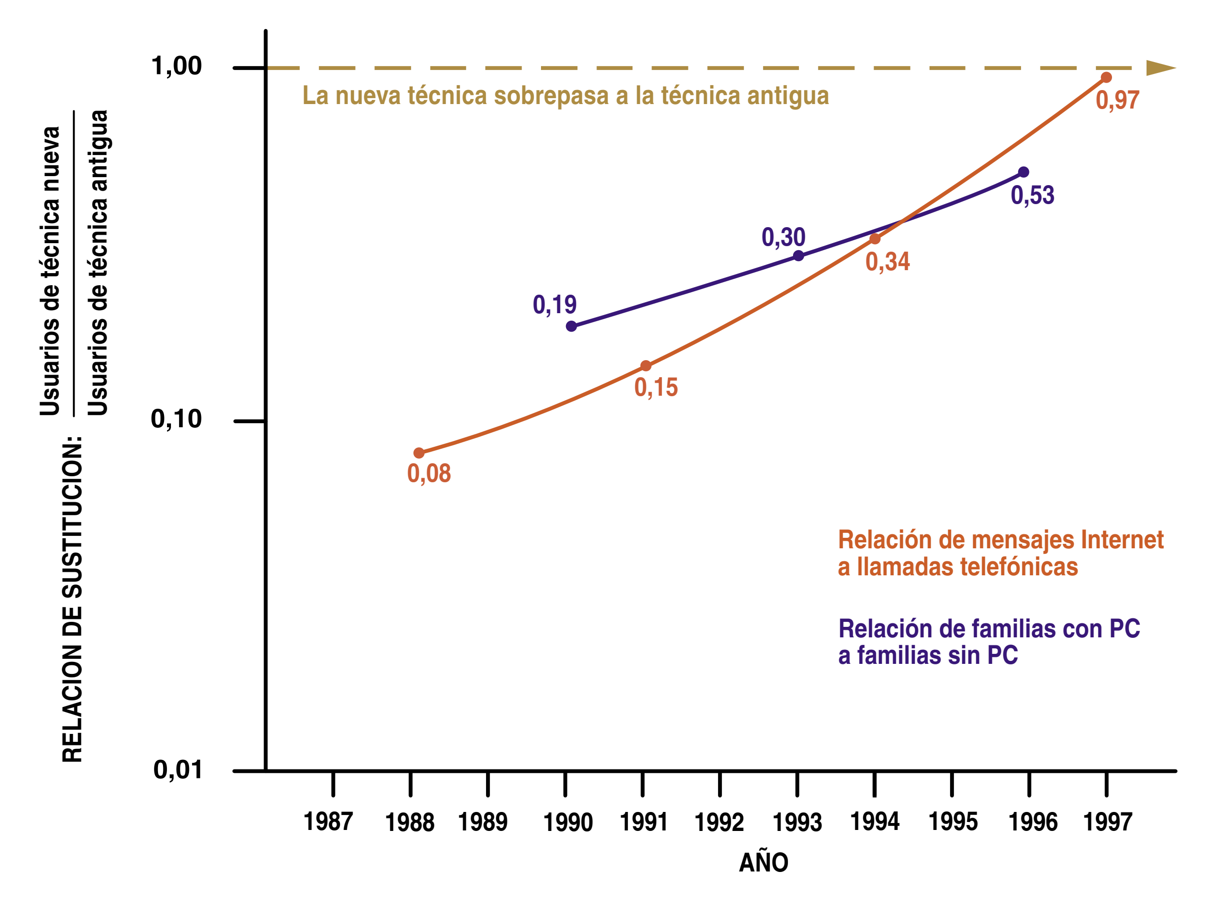
La transición no será suave, ni fácil de prever. En estos momentos iniciales, acaso lo que más nos importe sea la repercusión de la transmisión en banda ancha sobre nuestra vida diaria.

A estas alturas el lector conoce ya las cinco soluciones técnicas que entran en liza para llevar los servicios de banda ancha al hogar y a la oficina. Todo parece indicar que ninguna de ellas será vencedora absoluta y que, en cualquier caso, la superioridad técnica no decidirá qué compañías se alzarán con la victoria. En los cinco próximos años, más o menos, las grandes firmas van a emprender fusiones, inversiones, compras y nuevas fusiones para conseguir dominar el terreno competitivo. Las técnicas que adopten esas compañías serán las que prevalezcan.

Sin embargo, la banda ancha promete mucho más que la instauración de un servicio de telefonía y televisión rápido y económico. Para transformar, o sanear al menos, por medio de Internet grandes sectores de la economía habrá que establecer nuevos servicios, útiles y fiables, en la Red. El que tales beneficios cristalicen, y el momento en que ello ocurra, determinará el grado de penetración de la banda ancha y cuánto van a pagar los usuarios por disponer de transmisión de datos a alta velocidad, en una conectividad permanente.



1. LA CASA CABLEADA del futuro podría recibir muchas formas distintas de datos por una línea de muy alta velocidad. Por un solo canal de banda ancha llegarían Internet, el teléfono, la televisión, el fax y varias posibilidades incipientes, como el cine a la carta y el videoteléfono.



2. EL CORREO ELECTRONICO sustituye al servicio telefónico a un ritmo mucho más vivo que la introducción de ordenadores personales en las familias. Al alcanzar la línea quebrada en lo alto del gráfico, las relaciones se igualan a la unidad; llegar a ese punto de inflexión suele augurar consecuencias importantes. Datos recogidos de diversas fuentes por Mercer Management Consulting.

¿Necesitamos banda ancha?

¿Se desea realmente la banda ancha? Todas nuestras experiencias con Internet así lo afirman. La Internet actual es una suerte de red de banda ancha con andaderas. Incluso en esta fase incipiente, ha logrado enrolar clientes privados, ha fomentado la creatividad en las empresas y conectado en comunidades virtuales a individuos muy alejados entre sí. El índice de adhesión no tiene parangón; los hogares conectados se han multiplicado en un quinquenio. Por mor de comparación, 38 años necesitó la radio, 36 años el teléfono, 13 años la televisión y 10 años la televisión por cable para conseguir niveles de penetración semejantes.

Internet está llamada a ejercer un influjo aún mayor. Los mensajes enviados a través del Protocolo Internet (IP, Internet Protocol), que fundamentalmente es el correo electrónico (e-mail), van relegando la tradicional comunicación por teléfono y fax. El número de mensajes cursados por IP en cualquier período determinado llega ya a igualar el número de mensajes telefónicos y de fax, lo que supone una relación de sustitución de 1,0. La historia enseña que alcanzar tales puntos de inflexión produce efectos notables. Cuando las envolturas de papel y metal pasaron a ser de plástico, un resultado inesperado fue la aparición de comidas para llevar y el sector entero de la comida rápida, modificando los hábitos domésticos. Piénsese también en el abaratamiento del transporte aéreo, que redujo la proporción de los viajes por barco y ferrocarril e incluso de los desplazamientos en automóvil, con repercusiones en el comercio, la distribución de la población y las culturas regionales.

La transmisión en banda ancha seguirá siendo decisiva para que Internet sustituya a tipos de comunicación más antiguos. En mayo de 1999, una encuesta de Mercer Management Consulting reveló que los usuarios provistos de acceso de alta velocidad buscan información y hacen compras en directo a un ritmo casi doble que los que poseen módems analógicos de baja velocidad. La encuesta abarcó aproximadamente 1000 usuarios que acceden a Internet por módems de cable.

Por ahora están en minoría los equipados con acceso de alta velocidad (banda ancha) a Internet. Pero hay tres factores que se conjugan para acelerar la transición de banda estrecha a banda ancha: el precio de un cierto nivel de calidad operativa, el tiempo de respuesta y los efectos en la red.

Hasta la fecha la caída de los precios ha elevado la demanda de los servicios electrónicos. Cuando America Online introdujo la tarifa plana en diciembre de 1996, se disparó el tiempo de conexión por individuo; al no aplicarse la tarifa por minutos, la gente entra en Internet y permanece conectada, aunque no esté haciendo uso de ella ni examinando el correo electrónico. El proceso no es gradual: apenas sucede nada hasta que se llega a un precio umbral, a partir del cual estalla la demanda. Parece que la implantación de la banda ancha se acerca a este umbral, y esto hace esperar que pronto veamos nuevas y espectaculares mejoras en el comportamiento de los precios, con el asociado crecimiento de la demanda.

La banda ancha ofrece asimismo un acceso más rápido con tiempo de respuesta mucho más corto, lo

cual fomentará también la utilización de Internet. Dicho en pocas palabras, la mayoría de la gente no utilizará Internet a menudo y para tareas muy diversas, hasta que no disponga de la alta velocidad y activación permanente que caracterizan a la mayoría de los servicios de banda ancha.

Por último, y de la máxima importancia, al expandirse la red crece exponencialmente su valor para cada uno de los usuarios y su conjunto. La utilidad de un sistema de correo físico o electrónico que cubra el 99 por ciento de las direcciones posibles es mucho más del doble de la de otro sistema que sólo llegue al 50 por ciento de los destinos. Los actuales ordenadores y teléfonos de reducida anchura de banda conectan entre sí a los usuarios, pero sólo para relaciones de utilidad moderada. Es comparable a un perro que anda sobre las patas traseras; muchos dicen que el animal no lo hace del todo bien, pero lo asombroso es que lo haga. Continuando con la metáfora, la banda ancha —con más ofertas, más usuarios e interactividad muchísimo más útil— vendría a ser un galgo que corre sobre sus cuatro patas.

Creación de utilidad social

No hay duda de que el precio bajo, la alta velocidad y la disponibilidad constante acelerarán el crecimiento del comercio electrónico y las comunidades en contacto directo. Sin embargo, para que los usuarios se abonen a las comunicaciones en banda ancha, a un precio mayor que el de la telefonía clásica, la televisión o el servicio de Internet, el sistema ha de ofrecer algo más.

Ese plus añadido es la mayor utilidad social: el gozo o la satisfacción que el usuario obtiene del consumo de un bien o el aprovechamiento de un servicio. No es posible predecir exactamente qué servicios o bienes nuevos llegarán a aparecer, pero todos ellos tendrán que proporcionar las tres dimensiones esenciales de la utilidad social: la variedad y el deleite, el consumo eficaz y el rendimiento económico.

La primera categoría, variedad y deleite, guarda relación con el tiempo limitado para el ocio que tiene la mayoría de la gente. Siendo ese tiempo bastante fijo, las nuevas formas de comunicación y entretenimiento sólo podrán prosperar si desplazan a las que ahora existen. Internet ha comenzado ya a invadir el tiempo dedicado a ver televisión y cine (e incluso al sueño). Para que estas nuevas opciones sigan arrebatando tiempo a las tradicionales, habrán de conceder un mayor grado de control sobre la forma y el momento de ocurrencia de la comunicación y el entretenimiento. Si la variedad es amplia se podrá escoger entre más alternativas, y por tanto será más probable obtener una mayor satisfacción. A ello contribuirán unas herramientas más refinadas que ofrecerán nuevas posibilidades y consejos.

La eficacia en el consumo afecta a la fracción de su tiempo que un individuo dedica a leer el correo, pagar facturas, rellenar formularios de pedido, esperar citas, declarar impuestos y otras tareas accesorias por el estilo. La banda ancha adquirirá un nuevo valor si logra automatizar los procesos, elevando así la eficacia en el consumo. Para comprar un regalo, por ejemplo, se ha de elegir la mejor opción, dado el dinero y el tiempo disponibles. Internet no sólo permite comprar una corbata con más rapidez y comodidad, sino informarse también sobre regalos que ni siquiera se habían imaginado o que pudiera preferir su destinatario.

En cuanto al rendimiento económico, la cuestión primordial es que los presupuestos familiares están relativamente fijos y su variación es lenta. Las estadísticas revelan que la renta familiar media, con los ajustes por inflación, ha crecido muy poco en los últimos veinte años. Como sucede con el reparto del tiempo libre, la gente tendrá que suprimir ciertos gastos para costear los servicios de banda ancha.

Una red de banda ancha no será verdaderamente revolucionaria mientras no ofrezca servicios diferentes y superiores a los que hoy existen. En un experimento de mercado, Mercer Management Consulting utilizó una interfaz de realidad virtual para presentar las variaciones de un entorno de banda ancha hasta alcanzar unos mil usuarios, a los que se preguntó si contratarían diversos tipos de servicios futuristas y cuánto pagarían por ellos.

La mayoría de la gente contestaron que estarían dispuestos a cancelar sus abonos a televisión por cable si la compañía telefónica ofreciera servicios de entretenimiento o, a la inversa, que se darían de baja en la compañía telefónica si la del cable les diera servicio telefónico. También indicaron que tendrían que ver razones claras para realizar estos cambios: una recepción de la imagen o una gama amplia de servicios telefónicos.

Aunque la mayoría de los encuestados se prestaban a reajustar sus actuales presupuestos para teléfono y televisión, manifestaron que sólo pagarían más por el conjunto de ambos si la comodidad o la utilidad fuesen mucho mayores. No se gastarían más dinero en el servicio de televisión a menos que hubiera una total flexibilidad horaria en la programación (tal que pudiera solicitarse ver cualquier programa pasado anteriormente), así como que fuera posible elegir entre miles de películas y visionarlas cuando le apeteciera al usuario.

Plataformas abiertas y gestores inteligentes

El perfeccionar el acceso a películas de cine, programas de televisión, juegos, concursos y otros atrae a los consumidores y puede impulsar el desarrollo de la transmisión por banda ancha. Pero no basta con el deseo para conseguir unos canales de comunicación más capaces y económicos. En el caso de la televisión de banda ancha, habrá que lograr el acuerdo entre fabricantes sobre la normalización del formato digital, encontrar dinero para realizar la conversión a ese formato y almacenarlo de un modo que sea económico y accesible para la red de banda ancha. Hoy día estos requisitos son costosos y problemáticos. También habrá que solventar el espinoso tema de los derechos de propiedad intelectual.

Como se desprende de lo anterior, el éxito en los mercados de banda ancha requiere mucho más que la implantación de las mejores técnicas de acceso a la red. Además de una adecuada infraestructura, definida en términos generales, el que triunfe en la competición tendrá que predecir cómo obtendrán utilidad y valor social los usuarios y construir el modelo de empresa apropiado para suministrar estos servicios en explotación rentable.

No va a ser fácil que los proveedores conozcan lo que aprecian más los usuarios. Siempre que se ha mejorado la conectividad, las prioridades de los abonados han sufrido cambios espectaculares. En la primera fase de la reñida

3. LOS GASTOS EN LINEA de los usuarios de banda ancha superan el doble de los originados por quienes se conectan a Internet a través del módem telefónico. Datos recogidos por Mercer Management Consulting.

	BANDA ESTRECHA	BANDA ANCHA
Compras en directo (Ptas. por persona en los tres últimos meses)	12.000	30.000
Búsqueda de información para compra de productos (número de búsquedas por persona en los tres últimos meses)	7	16

competición de Internet, la mayoría de los usuarios se contentaban con encontrar un proveedor de servicios digno de confianza. Tras el crecimiento exponencial de la información de acceso directo y los sitios Web, los usuarios y los inversores recurrieron a portales que les ayudan a navegar por los mares de datos. El comercio electrónico —compra y venta de bienes y servicios a través de Internet— surgió entonces como una nueva zona de actividad lucrativa.

Aunque en la próxima fase va a haber una intensa demanda de transmisión en gran anchura de banda, no bastará para obtener rendimientos económicos positivos, si además no se ofrecen aplicaciones sugestivas que mejoren la utilidad social. Los beneficios acudirán hacia las empresas capaces de crear productos y servicios que aporten un valor superior al de la mera elección de películas a la carta o la videoconferencia. De hecho, los proveedores de servicios más avezados, como las compañías telefónicas y de distribución por cable, van a basar el desarrollo de la banda ancha en una fértil plataforma informática de normalización abierta, de la cual brotarán miles de innovadoras aplicaciones.

El paradigma será semejante al que condujo, años atrás, a la feliz introducción del sistema operativo DOS para ordenadores; Microsoft lo concibió como plataforma abierta sobre la cual cientos de compañías pudieran crear aplicaciones, razón por la cual se hizo con el mundo informático. Análogamente aparece ya un conjunto de aplicaciones de red, que podríamos calificar como residente en la Web.

Los actuales proveedores del servicio Internet conectan entre sí ordenadores, centrales telefónicas e instalaciones de distribución de televisión por cable. Pero al extenderse el ámbito cubierto por Internet, también crecerá la influencia de un grupo que ahora despunta: los proveedores de servicios de aplicaciones (ASP), que ofrecen aplicaciones alojadas en la Web. Entre ellas, la gestión de bases de datos empresariales dispares, la explotación y el mantenimiento de servidores que proporcionan correo electrónico a pequeñas empresas que han optado por no comprar ni instalar el equipo necesario.

De aquí a unos cinco años, las plataformas abiertas se convertirán también en un elemento clave de las redes "inteligentes". Una vez que sean viables las exploraciones y análisis en banda ancha, deberán proliferar los programas de gestión inteligente, largamente buscados, que sean capaces de vagar por la red y hacer el trabajo útil mientras los usuarios duermen. No pintamos un cuadro futurista; Cisco Systems y otros suministradores ya están sentando las bases de la plataforma informática fundamental requerida.

Las aplicaciones que proporcionan gestión inteligente elevando la productividad personal y profesional de los usuarios pondrán en juego un potencial inmenso. La gente aceptará pagar más por este género de servicios, frente a los servicios tradicionales de televisión o teléfono, y al hacerlo favorecerán la penetración de la transmisión en banda ancha.

Tanto para las aplicaciones alojadas en la Web como para las de gestión inteligente, lo primero que va a ofrecerse probablemente serán sustitutivos de las actividades actuales. La videoconferencia podrá entonces reemplazar ciertas reuniones físicas, ahorrando tiempo y gastos de viaje. La distribución de música en directo podría sustituir a los discos compactos de audio, e incluso la distribución de vídeo quizá llegue a desterrar la televisión al uso. Sin embargo, más allá de cualquier sustitución, todos presentimos la aparición de futuras aplicaciones: la gestión inteligente creará servicios enteramente nuevos que sobrepasan nuestro actual marco de referencia.

Cambios sociales

Al compás de estos innovadores servicios, el uso de la banda ancha promete transformar radicalmente las vidas humanas. A lo largo de la historia, avances técnicos que en su tiempo parecían fútiles han provocado cambios notables e inesperados en las estructuras sociales y económicas. Cuando la energía eléctrica llegó a las ciudades, en las postrimerías del siglo XIX, era un artículo de lujo accesible sólo a las clases altas. Cuatro generaciones después, el acondicionamiento de aire por medios eléctricos se extendía ya por las oficinas y viviendas ordinarias. En Estados Unidos, la conquista del clima sureño por la climatización eléctrica, unida al menor coste de la vida, fue un factor decisivo para hacer apetecible el traslado desde el norte de fábricas, trabajadores, directivos y jubilados.

Thomas Edison y sus contemporáneos difícilmente hubieran imaginado que iban a contribuir a la recuperación del sur estadounidense, y sería absurdo tratar de detallar la clase de cambios derivados del empleo de la banda ancha. Pero sí podemos pronosticar que la creación de una red de banda ancha dotada de gestión inteligente provocará notables transformaciones sociales.

Cuando finalmente nazca una plataforma de aplicaciones en banda ancha, los usuarios que tenga conectados pueden ser sujeto u objeto de operaciones sólo limitadas por la imaginación de los empresarios. Estos contemplan ya nuevas formas de juegos, educación y atención médica "a distancia", distribución en vídeo de noticias personalizadas a una pantalla colgada en la pared de la cocina, calendario de espectáculos en directo acompañado de comentarios de los críticos y menús para petición de localidades, paseos virtuales en tres dimensiones a través de atracciones remotas, y puestos de mercado automatizados en los que unos gestores inteligentes comprarán y venderán en nombre del interesado.

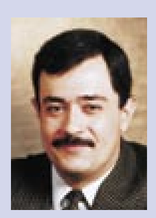
Ciertos efectos de esta explosión de servicios quizá no sean bien acogidos, al menos inicialmente. Por ejemplo, la muy superior capacidad de elección que se ofrece a los usuarios podría lograrse a costa de que la red registre en directo todos los movimientos del individuo: es el clásico dilema técnico del Gran Hermano. Asimismo, la expansión electrónica del co-

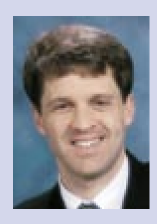
mercio y el entretenimiento puede disminuir el contacto real con la gente. En último término, la banda ancha puede ejercer una acción niveladora, ofreciendo un acceso igualitario a los datos y a las oportunidades en cualquier situación económica. Pero es también posible que ahonde la división entre ricos y pobres, ya que hasta ahora la técnica de la información ha hecho crecer la demanda de trabajadores capacitados y mejor retribuidos, al tiempo que ha reducido la necesidad de mano de obra inexperta. En los dos primeros decenios de este siglo, el creciente uso de la electricidad llevó aparejado el empleo de más trabajadores con mayor nivel de formación. En todo caso, pese a las consecuencias aparentemente negativas para los trabajadores de baja capacitación, poca gente renunciaría hoy a la energía eléctrica.

Esperemos que la próxima generación contemple Internet como una bendición que ofrece a cada individuo un ciber-asistente, y no como un almacén de compañía orwelliano al que todos estamos atados.



DAVID D. CLARK dirige el grupo de arquitectura de red avanzada en el laboratorio de informática del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Tras doctorarse a mediados de los setenta, ha sido una figura influyente en el desarrollo de Internet. En los años ochenta dirigió la arquitectura de desarrollo del Protocolo de Internet. Ultimamente ha trabajado en nuevas técnicas de redes y ampliaciones de Internet para admitir tráfico en tiempo real y explicitar asignaciones de servicios, determinación de precios y cuestiones económicas conexas.

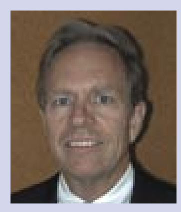




MILO MEDIN y JAY ROLLS trabajan en el servicio Internet de cables Excite@Home, como jefe técnico y director de ingeniería de red, respectivamente. Mientras perteneció al Centro de Investigación de la NASA, Medin inició el proyecto global de Internet en dicha organización, que proporcionaba infraestructuras de red para fines científicos a más de 200 centros en cinco continentes. Antes de incorporarse a Excite@Home, Rolls dirigía las técnicas de multimedios en Cox Communications, compañía operadora de cable y telefónica local.



GEORGE T. HAWLEY trabajó en planificación de sistemas de transmisión para Bell Telephone Laboratories de 1963 a 1983. Durante ese período se doctoró en ingeniería eléctrica en el Instituto Politécnico de Brooklyn. En 1995 fue cofundador de Diamond Lane Communications, adquirida por Nokia en el pasado marzo, donde es jefe técnico de la Unidad de Acceso en alta velocidad. Su dirección es: george.hawley@nokia.com.



PAUL W. SHUMATE, JR., es director ejecutivo de la Sociedad de Láseres y Electroóptica del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE). Con anterioridad estuvo al frente de la investigación en Telcordia Technologies en Morristown, N.J.



ROBERT P. NORCROSS es vicepresidente de Mercer Management Consulting en Washington. Su trabajo se centra en ayudar a las compañías que desean entrar en el campo de las telecomunicaciones. Su dirección es: rob.norcross@mercermc.com.



JOHN SKORO dirige la división de acceso inalámbrico en banda ancha de Nortel Networks en Dallas. Pasó ocho años en Motorola, donde ayudó al lanzamiento del primer sistema digital inalámbrico de comunicaciones bidireccionales del mundo.





P. WILLIAM BANE y STEPHEN P. BRADLEY colaboran ocasionalmente en escritos sobre el futuro de Internet. Bane es vicepresidente de Mercer Management Consulting. Bradley ocupa la cátedra William Ziegler en la Escuela de Administración de Empresas de Harvard.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

RESIDENTIAL BROADBAND. George Abe. Macmillan Technical Publishing, Cisco Systems, 1997.

THE CONVERGING WORLDS OF TELECOMMUNICATIONS, COMPUTING AND ENTERTAINMENT. P. William Bane, Stephen P. Bradley y David J. Collis en *Sense & Respond: Capturing Value in the Network Era*. Preparado por Stephen P. Bradley y Richard L. Nolan. Harvard Business School Press, 1998.

RESIDENTIAL BROADBAND: AN INSIDER'S GUIDE TO THE BATTLE FOR THE LAST MILE. Kimberly Maxwell. John Wiley & Sons,1998.

IMPLICATIONS OF LOCAL LOOP TECHNOLOGY FOR FUTURE INDUSTRY STRUCTURE. David D. Clark en *Competition, Regulation, and Convergence: Selected Papers from the 1998 Telecommunications Policy Research Conference*. Lawrence Erlbaum, 1999.

Shawn Carlson

Reproducciones del universo atómico

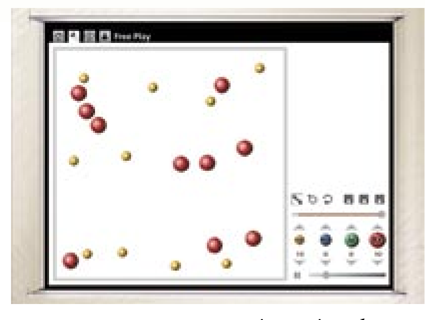
Asumiendo un universo formado por bolas de billar de tamaño atómico, los físicos, apoyados en unas cuantas definiciones y algo de matemática, podrían ofrecernos una explicación cabal de nuestro mundo. O, lo que es lo mismo, de mecánica estadística, teoría que pone un límite a la cantidad de trabajo que puede desarrollar una máquina. No sólo. La mecánica estadística describe también los agentes que gobiernan la meteorología; rige temperaturas y presiones dentro de los astros, y ahorma la evolución del cosmos. Incluso arroja luz sobre la flecha del tiempo: por qué recordamos el pasado y no el futuro. Albert Einstein y Richard Feynman la consideraban la hazaña máxima de la física clásica.



Cuando la temperatura es baja los átomos de helio (dorados) *y los de kriptón* (rojos) *se agrupan...*



pero cuando el gas se calienta, los átomos de helio, más ligeros, se separan...



y a temperaturas aún más altas, los átomos de kriptón, más pesados, también se disgregan

Muchos aficionados han eludido tan importante materia porque, aquí, cuanto más alto está el listón más cuesta saltarlo. Un centímetro cúbico de aire a la presión atmosférica contiene más de 10 trillones de átomos de diferentes tamaños, que chocan entre sí a diferentes velocidades. No hay ordenador capaz de trazar las trayectorias de todas esas partículas, y aunque lo hubiera, ninguna mente humana podría entender su lógica. Por eso, los físicos han ideado unos métodos matemáticos, ingeniosos pero endiabladamente difíciles, para tratar de obtener alguna luz en semejante caos.

El truco consiste en idear modelos que nos permitan aventurar los mecanismos en cuya virtud se promedian esas colisiones aleatorias para producir la temperatura, presión, entropía y otras propiedades de la materia que tenemos al alcance. Una buena representación mental puede aclarar el comportamiento de la materia y, a la vez, facilitar proyectos de química, sonido, transmisión del calor, cristalografía y técnicas del vacío que el aficionado pueda ejecutar. Y ésta es la razón de escribir sobre Molecular Dynamics, un innovador ejemplar de software educativo. Aunque no cubre todos los temas abarcados por la mecánica estadística y deja de lado los efectos mecanocuánticos, constituye el software de modelado más accesible que yo haya visto.

Este tipo de simulaciones no es nada nuevo. Muchos seguidores de estas páginas habrán escrito programas como éstos en los días de la computación recreativa [*véase* Juegos de Ordenador, por A. K. Dewdney; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo 1988]. En la Telaraña Mundial se ofrecen algunas versiones limitadas (tales como el demonio de Maxwell en cougar.slvhs.slv.k12.ca.us/~pboomer/physicslectures/maxwell.hmtl).

Pero Molecular Dynamics permite efectuar una impresionante serie de experimentos virtuales acerca de la interacción entre diferentes átomos bajo todo tipo de condiciones. El programa se compone de numerosos módulos descriptivos de la difusión, la presión osmótica, la relación entre presión y temperatura, la distribución de velocidades moleculares en un gas y otros temas. Y puede emplearse



2. Representación tridimensional vista de un cristal de kriptón frío con átomos de helio en su superficie



Al crecer la temperatura, los átomos de helio vagan por la superficie...



y a temperaturas aún más altas todo se desintegra

para descubrir cosas cuyo hallazgo pondría en un brete teórico al físico más ducho en matemática.

La simulación discurre con tal rapidez, que la primera vez que la vi en una conferencia hubiera asegurado que escondía truco. El ponente introdujo 200 átomos eléctricamente neutros en un volumen tridimensional; pertenecían, a partes iguales, a cuatro clases distintas. Las partículas se colocaron en sus posiciones correctas tan velozmente, que pensé que se trataba de una grabación para ordenador y no de una simulación en tiempo real. Decidí retar al ponente.

En la naturaleza pueden unirse incluso los átomos neutros. La repulsión mutua de los electrones orbitales polariza los átomos; queda así un intervalo de distancias dentro del cual los átomos polarizados se atraen. Solicité al ponente que añadiese esas interacciones electrostáticas y rebajara, poco a poco, la temperatura. Así lo hizo. Los átomos más pesados se agrupaban; los más ligeros, revoloteaban presurosos de aquí para allá, de acuerdo con lo esperado. Bajó rápidamente a cero la temperatura, y los átomos libres se reunieron en pequeños grupos aislados, de acuerdo también con lo previsto.

A los geólogos no les sorprende esa tendencia al agrupamiento. Las rocas ígneas que se enfrían lentamente poseen granos minerales mayores que las que se enfrían de una manera brusca. Molecular Dynamics permite estudiar los principios subyacentes en ese proceso (llamado recocido) haciendo variar el número y la clase de los átomos, así como la velocidad de enfriamiento. Deteniendo la simulación en cada temperatura y rotando el recipiente virtual, pueden contarse los agrupamientos y observarse en éstos cuántos átomos de cada clase hay en cada uno. Lo que nos lleva a un ensayo sugestivo: repetir el experimento varias veces y representarse gráficamente el tamaño medio de los agrupamientos en función de la velocidad de enfriamiento. Quizá se nos revelen aspectos fundamentales del recocido difíciles de deducir por vía matemática.

Comencemos con un cristal cúbico de 63 átomos de kriptón. Se añaden algunos átomos de helio, que se encaminan a la superficie. Basta subir un poco la temperatura, para que los átomos de helio discurran sin rumbo por la cara del cristal. A una temperatura un poco mayor, los átomos de helio abandonan el cristal y, si la temperatura se eleva aún más, el cristal se disgrega. Este tipo de efectos se observa en los cristales reales. Sobre ello pueden hacerse otros experimentos. Trátese de disminuir la temperatura y ver si es posible hacer que el cristal se reconfigure. Seguidamente represéntese el tiempo requerido para que el cristal de kriptón se forme en función del número de átomos de hidrógeno que rebotan aquí y allá. ¿Bloquea el hidrógeno la formación del cristal? ¿Por qué?

Podemos también sondear en el comportamiento de los gases, si queremos averiguar el comportamiento de un gas ante cambios de temperatura, volumen o número y tipos de sus átomos. La simulación reproduce hasta cierto punto las proporcionalidades que se combinan en la ley de los gases ideales. Pero sólo aproximadamente. Y ello porque la propia ley de los gases ideales es sólo una aproximación; la ley sólo rige si los átomos del gas ocupan una fracción despreciable del volumen del recipiente y si las energías cinéticas de los átomos son mucho mayores que las energías potenciales interatómicas que tienden a agruparlos. Como resultado, los gases reales se separan de la ley de los gases ideales para las densidades elevadas o las temperaturas bajas. Molecular Dynamics incorpora esos efectos de un modo automático.

Mi módulo favorito, "Distribución de velocidades de Maxwell-Boltzmann", permite descubrir el número mínimo de átomos necesarios antes de que los trucos matemáticos de los físicos empiecen a surtir efecto. En el siglo XIX, la mecánica estadística demostró su capacidad para predecir la fracción de átomos que, en el seno de un gas a una temperatura dada, se mueven con cierto rango de velocidades. La curva de la fracción en función de la velocidad presenta un ascenso rápido (lo que significa que hay pocos átomos moviéndose a las velocidades más bajas) y una cola larga, lo que revela que hay átomos moviéndose a velocidades mayores que la media. Dentro de la caja puse 100 átomos de helio y argón y observé la distribución de velocidades en tiempo real. Apenas unos cuantos choques y ambas curvas adquirieron el aspecto imaginado. Los átomos más pesados presentaban el máximo para una velocidad menor, tal como predice la teoría. Puede ser entretenido retirar átomos y observar cómo se deteriora la distribución.

Por desgracia, el programa adolece de unas omisiones patentes. Por ejemplo, no permite tratar el flujo calorífico, el trabajo o la entropía. Así, no es posible simular un pistón. Además, las materias responden a estrategias didácticas dispares: ciertas partes se indican para principiantes, mientras que otras acaso sean más adecuadas para graduados. Pese a sus limitaciones, Molecular Dynamics es una magnífica ayuda para comprender de qué modo los átomos crean nuestro universo.

Para más información acerca de este y otros proyectos, visite el sitio Web de la Society for Amateur Scientists en earth.thesphere.com/SAS. Puede también escribirse a la sociedad a 4735 Clairemont Square, PMB 179, San Diego, CA 92117.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Ian Stewart

Contorsión cónica

El cono es bastante más que el cucurucho de los helados. La geometría del cono les era conocida a los griegos de la antigüedad clásica, sobre todo, por las elegantes curvas que se obtienen al seccionar un cono con un plano. Los griegos se deleitaron en la intrincada geometría de estas secciones cónicas —la elipse, la parábola y la hipérbola— y descubrieron cómo utilizarlas para resolver problemas inalcanzables con sólo regla y compás.

Entre tales problemas se contaban la trisección de un ángulo y la construcción de un cubo de volumen doble que el de un cubo dado. Ambos, en el fondo, consisten en la resolución de una ecuación de tercer grado, es decir, una ecuación en la que el máximo exponente de la incógnita es tres. Las secciones cónicas pueden servir para resolver tales problemas porque los puntos donde se cortan dos secciones corresponden a soluciones de ecuaciones de tercero o cuarto grado. La regla y el compás, por contra, sólo pueden resolver ecuaciones de segundo grado.

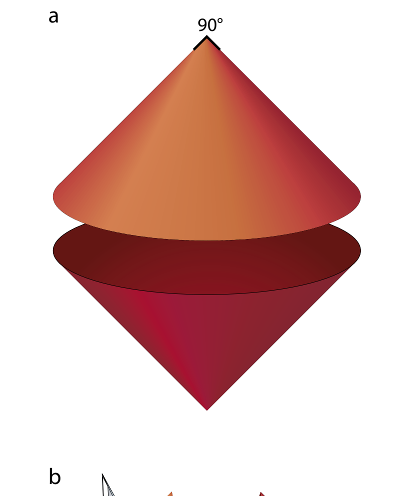
El cono ha tenido para los matemáticos menor interés que sus secciones planas; quizá por la simplicidad de su forma. ¿Será posible decir algo nuevo sobre este humilde cuerpo? Pues sí, en efecto. En mayo de 1999, C. J. Roberts me escribió acerca de una forma geométrica muy curiosa, a la que llama esfericono.

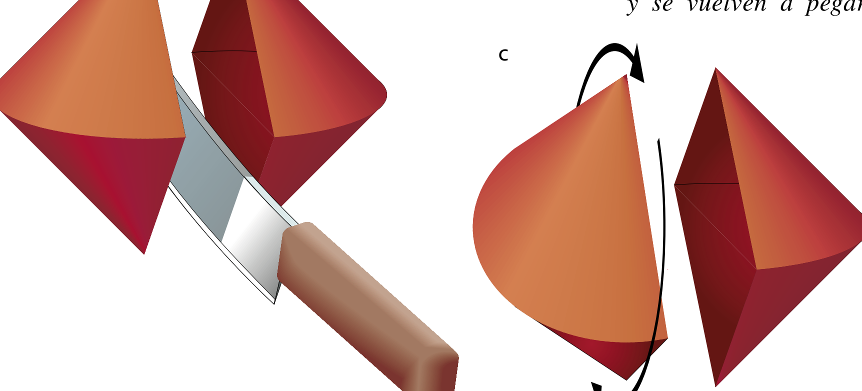
Consiste en un doble cono —dos conos idénticos adosados base con base—, pero con una torsión. Su construcción es sencilla. Al seccionar un doble cono mediante un plano que contenga a sus dos vértices, la sección que se obtiene es rómbica, esto es, un paralelogramo de cuatro lados iguales. Usando conos de la forma precisa, se consigue que esa sección rómbica sea cuadrada. A diferencia de todos los demás rombos, el cuadrado posee una simetría adicional: haciéndolo girar un ángulo recto en torno a su centro, vuelve a superponerse sobre sí mismo. Podemos, pues, seccionar uno de estos dobles conos de vértice a vértice, a lo largo del eje común, hacer girar un ángulo recto una de las mitades y pegar nuevamente las dos piezas. El resultado es un esfericono. Gracias al giro no se trata de un doble cono, sino de una bestia mucho más interesante. Nunca hasta ahora había yo oído mencionar esta figura en sitio alguno.

El esfericono puede construirse con una sola pieza de cartulina delgada, recortada para que se formen cuatro sectores circulares idénticos unidos por los lados, que vayan mirando en direcciones alternas. Para diseñar esta figura hemos de determinar el ángulo que han de formar los radios limitantes del sector. Supongamos que estos lados tengan longitud 1. Si el doble cono tiene sección axial cuadrada, por el teorema de Pitágoras, la base de cada componente ha de tener un diámetro de $\sqrt{2}$. Por tanto, la circunferencia de la base mide $\pi\sqrt{2}$. La longitud del arco del sector es la mitad (porque el doble cono ha sido seccionado por la mitad para construir un esfericono). El ángulo del sector resulta ser, pues, de $\pi\sqrt{2}/2$, o sea, $90\sqrt{2}$ grados, unos 127,28 grados.

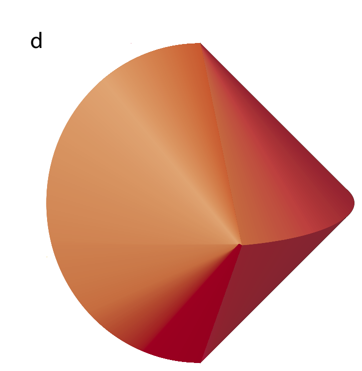
Si recortamos la figura desarrollada que vemos en la figura 2 podemos curvar los sectores hasta formar semiconos y pegar después la lengüeta al borde correspondiente. Con un poco de ajuste, las bases de los semiconos encajarán exactamente, sin intersticios; podemos pegar las juntas con cinta adhesiva.

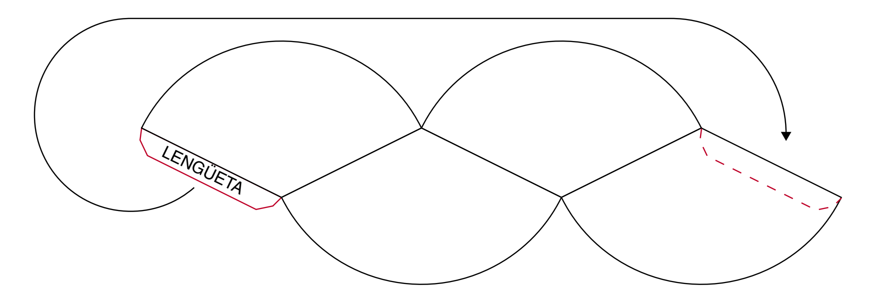
La primera delicia del esfericono es que... ¡rueda! Sobre una superficie plana, un cono sólo puede rodar en círculos. Un doble cono puede rodar en círculos de sentido horario o en





1. Para construir un esfericono, se adosan dos conos por la base (a)*; después, se cortan por un plano que pase por los dos vértices* (b)*. Se hace girar 90 grados una de las mitades* (c) *y se vuelven a pegar las dos mitades* (d)





2. Una forma más sencilla de construir un esfericono consiste en recortar en cartulina una pieza que tenga la forma indicada (aunque mayor), pegar la lengüeta al borde correspondiente y unir las bases de los semiconos

círculos de sentido antihorario, pero sólo rueda en línea recta lanzándolo muy rápidamente o montándolo sobre raíles. El esfericono realiza un vaivén controlado, que sigue, en promedio, una línea recta. Primero está en contacto con la superficie plana uno de los sectores cónicos, después es el otro. Por eso, al avanzar va bamboleándose alternativamente a derecha y a izquierda. Déjelo rodar desde lo alto de una pendiente suave para observar su bamboleo cuesta abajo.

La carta apuntaba también algunos de los fascinantes atributos del esfericono: tiene una cara continua; un esfericono puede rodar interminablemente alrededor del otro. Intrigado, solicité más información, y Roberts me envió una enorme caja de cartón que prácticamente no pesaba nada. Contenía un gran retículo de unos 50 esfericonos, pulcramente ensamblados con cinta transparente. Este retículo, lo mismo que la celdilla atómica de un cristal, se repite indefinidamente en tres dimensiones.

Una de las razones de que el esfericono posea tan elegantes propiedades geométricas es que sus cuatro "aristas" —las líneas donde concurren los sectores que lo componen— están situadas a lo largo de cuatro de las aristas de un octaedro regular. Los otros cuatro lados del octaedro corresponden a rectas bisectrices de los ángulos de los vértices de los sectores. El octaedro, a su vez, está íntimamente relacionado con el cubo: si señalamos el punto medio de cada cara de un cubo y unimos los puntos mediante rectas se obtiene un octaedro. Y los cubos, claro está, se apilan de forma regular, creando una capa plana o llenando un espacio tridimensional.

Roberts, que en la actualidad cuenta 47 años, inventó el esfericono hace unos 30 años. En la escuela, su fuerte era la geometría; después empezó a trabajar de aprendiz de carpintero. No puede sorprender que su primer esfericono estuviera tallado en madera. Su punto de partida fue la cinta de Möbius, una banda de papel a la que se imprime una torsión de 180 grados antes de unir sus extremos. Roberts se percató de que, por tener el papel un espesor definido, la sección transversal de la banda es en realidad un rectángulo largo y delgado. Convirtiendo la sección transversal en un cuadrado uniremos los topes con un giro de sólo 90 grados, produciendo un sólido cuya superficie exterior consta de una sola cara curva. Esta figura, sin embargo, tiene un agujero en su centro: es un anillo. ¿Existe un sólido que no tenga forma anular y cuya superficie exterior tenga una sola cara curva? Un día, mientras Roberts estaba trabajando con un listón de sección transversal cuadrada, empezó a pensar en fundir una cara con la siguiente cepillando una curva en torno a los extremos. Hagamos esto en ambos extremos, eliminemos la madera intermedia y se obtiene un esfericono.

Construyó uno en caoba y se lo regaló a su hermana, quien lo conserva desde entonces. Después se olvidó de la cuestión hasta 1997, cuando yo di una serie de charlas matemáticas televisadas y me refería a la simetría. En ese punto revivió el interés de Roberts, y se decidió a escribirme.

Si colocamos dos esfericonos uno junto al otro, cada uno puede rodar sobre la superficie del otro. Cuatro esfericonos dispuestos en un bloque cuadrado pueden todos rodar unos alrededor de otros simultáneamente. Y ocho esfericonos pueden encajar en la superficie de un esfericono de modo que cualquiera de los sólidos exteriores pueda rodar sobre la superficie del central.

Las posibles disposiciones de los esfericonos parecen interminables. Dejo para los lectores el placer de divertirse con este juguete de extrema sutileza matemática y de idear por sí mismos nuevas configuraciones.

Acuse de recibo

El acuse de recibo que acompañó a la sección "La cuadratura del cuadrado" [septiembre de 1997] dio comienzo a una correspondencia que aún prosigue. Robert T. Wainwright preguntaba: ¿Cuál es la máxima región convexa que se puede pavimentar mediante triángulos equiláteros con lados de longitudes enteras y colectivamente primas (sin un mismo divisor común para todas ellas)? En Acuses posteriores fui dando cuenta de los resultados de los lectores; en particular, disposiciones de 15 losetas con áreas de 4715 [octubre de 1998] y de 4782 [mayo de 1999]. (Por conveniencia, la unidad de área es la del triángulo más pequeño del recubrimiento.)

Inadvertidamente dejé de mirar una carta enviada por John W. Layman, del Instituto Politécnico y la Universidad de Virginia, en marzo de 1998, que contenía una disposición de 15 losetas con un área de 5114 ¡mayor que cualquiera de las mencionadas antes! (Mis más sinceras disculpas.) Más recientemente, Layman ha encontrado una formación de 16 losetas con un área de 9158 (*derecha*) y otra de 17 que tiene un área de 16.665. También ha descubierto una disposición de 18 losetas con área de 29.214. *—I.S.*

NEXOS

James Burke

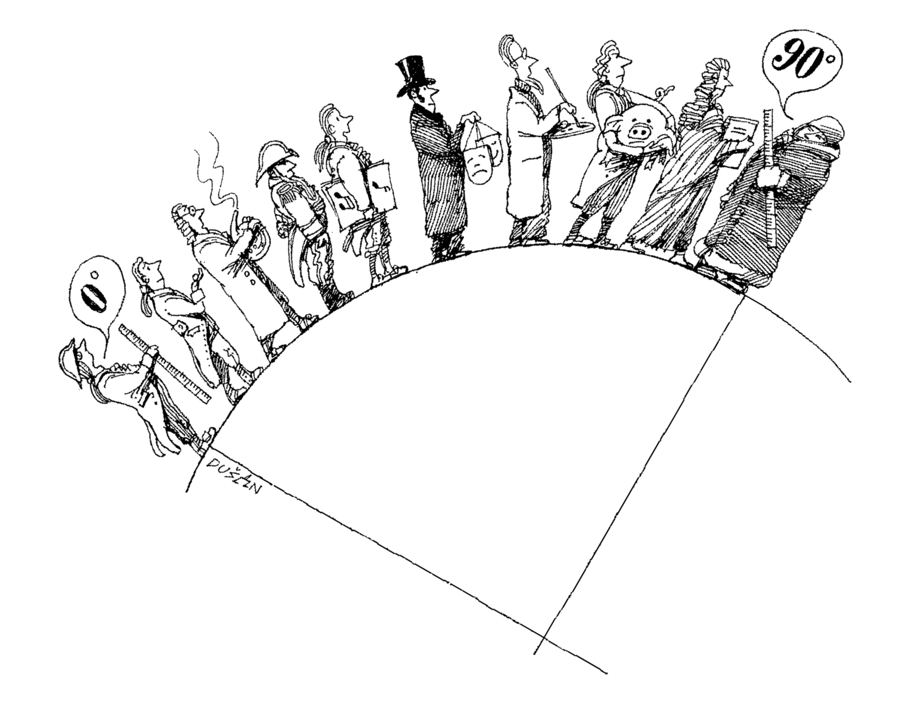
Una cuestión de grados

En la cabina de un 777 transatlántico, mientras gozaba de la magia de la navegación, reparé en cuánto debemos a dos expediciones francesas realizadas en el siglo XVIII, enviadas para comprobar si un grado de meridiano era más largo en el norte que en el ecuador. Se envió al sur, al Perú, al intrépido Charles-Marie de La Condamine. Descubrió que un grado era más corto en el ecuador, por ser la Tierra achatada. De regreso a casa en 1743, La Condamine descendió por el Amazonas, sin levantar la péñola. Una de las muchísimas cosas que describió fue el árbol *hevea*. Si se dejaba secar, su savia se transformaba en una sustancia milagrosa que realizaba algo rarísimo y maravilloso en el siglo XVIII: botaba.

Hacia 1820, un fabricante de carruajes llamado Thos. Hancock compraba en Sudamérica toda la savia que llegaba a sus manos, que no era mucha. Con ella hacía pretinas, fajas y ligas, suelas y tacones, dientes postizos y todo tipo de bragueros, ceñidores y vendajes quirúrgicos. El mercado del caucho era insaciable, especialmente cuando Hancock y su colaborador Chas. Macintosh lo colocaron entre láminas de algodón e inventaron el impermeable. Escribieron a las autoridades solicitando que se cultivara en las colonias orientales, una buena manera de hacer dinero. Por respuesta obtuvieron el atronador silencio de los Reales Jardines de Kew (a quienes competía la realización de tales aclimataciones).

Cuando tuvo que encargarse del asunto, William Hooker estaba más interesado en otro producto del mismo confín del mundo: la corteza del árbol de la quina, fuente de la quinina. Lo reseñable del caso es que el personal civil y militar del Imperio Británico destinado a las partes más húmedas del globo caía como moscas por efecto del paludismo. La quinina podría poner a todo el mundo de nuevo en pie para que el sol continuara sin ponerse en el Imperio. En 1852 el gobierno británico recibió una petición formal para financiar una expedición que recogiera plantones de quina. Traídos y cultivados se transplantarían en la India. Pero los arbolillos no lograron aclimatarse.

Ni siquiera la ciencia pudo echar una mano. William Perkin fue un químico que pasó en 1856 varias semanas intentando la síntesis química de la quinina. Por fin dio con un amasijo oscuro que, ni de lejos, era quinina. Lo tiró por el fregadero, vio lo que sucedía al entrar en contacto con el agua y se convirtió en millonario de la noche a la mañana, pues había inventado por accidente el primer tinte artificial de anilina. La materia prima que Perkin había utilizado era el alquitrán de hulla, del que ya hemos hablado en otra ocasión. Disponible en cantidades industriales gracias a William Murdock, compañero de James Watt; aquél le robó la idea de la luz de gas a Archibald Cochrane, octavo conde de Dundonald y aficionado a la química experimental. Fabricó gas de carbón mientras se aprestaba a sintetizar brea con la que recubrir el casco de los barcos para evitar que los *Teredo*, moluscos marinos, se cebaran en ellos. La marina rechazó su invento y lo arruinó.



Por ironía de las cosas, su hijo Thomas, el noveno conde, llegaría a almirante de la marina británica, tras una brillante carrera como jefe de la marina chilena primero, y de la brasileña y de la griega más tarde. Thomas inventó también el "plan de guerra secreto". Secreto incluso hasta para nosotros. Cochrane sostuvo que su plan era capaz de destruir cualquier flota o fortaleza del mundo. En 1811 un comité *ad hoc* del gobierno británico investigó el plan secreto y lo rechazó porque si bien lo consideró "infalible" e "invencible", lo juzgó "inhumano". Desapareció por ensalmo.

Uno de los componentes del comité era William Congreve, cuyo invento, el cohete Congreve, le reportaría el canto de la fama. Cuando menos el canto. Como en el verso "el brillo rojo de los cohetes", porque fueron centenares de "congreves" lo que los británicos lanzamos contra Fort McHenry en 1814. La anécdota inspiró a un joven Francis Scott Key el actual himno de los Estados Unidos. La música se debe, curiosamente, a un inglés, John Stafford Smith, organista de la Capilla Real. Hacia el 1770 Smith lideraba la lista de ventas con baladas florales. Fue también algo parecido al primer musicólogo. Smith dependía de Samuel Arnold, compositor que reunía obras de otros,

añadía algo de cosecha propia y quedaba como un señor. En varias ocasiones, Arnold fue director de música del Covent Garden y del Drury Lane. En ambos teatros trabajó el Spielberg del período, David Garrick, quien introdujo los primeros efectos especiales en escena y el realismo en la ejecución.

Fue mecenas de Garrick la aristócrata Lady Dorothy Savile, de fina mano para los dibujos satíricos. Su marido, Lord Burlington, también contaba en el mundo del arte. Burlington tenía un protegido, William Kent, que enseñaría a Lady D. a dibujar. Hay quienes creen que Kent era un pintor de tercera fila y un arquitecto de segunda, pero un jardinero de primera. Es posible. Su gran obra arquitectónica fue el Holkham Hall de Norfolk. Se considera que se trata de la primera vez en que un arquitecto inglés diseñó una casa, su interior y el mobiliario, todo a la vez. Unos le aplauden y otros abominan del resultado sin rebozo.

El propietario de la casa se llamaba Thomas Coke, conde de Leicester. En 1822 y a los 69 años, viudo y con tres hijos, contrajo segundas nupcias y tuvo seis retoños más. Un hombre dado a la reproducción, podría pensarse. También la popularizó entre los granjeros, por lo que respecta a ovejas, cerdos y vacas. Como parte de la revolución agrícola, Coke encabezó prácticas tan interesantes como la rotación de cultivos, la producción de nabos (que alimentaban el ganado en invierno) y tréboles (que aumentaban el rendimiento porque nitrogenaban la tierra, aunque entonces aún no se supiera). Muchas de sus mejores ideas las recibió de Jethro Tull, cuyo libro sobre agricultura, publicado en 1731, fue un auténtico éxito en Gran Bretaña y, veinte años más tarde, en Francia.

Entre los seguidores entusiastas de Tull destacó Voltaire. Y así lo vemos aplicando los principios del sajón en la parcela que cuidaba en su retiro de Ferney. Aconteció este confinamiento suizo tiempo después de la muerte de su amor, uno de los muchos de Voltaire. Hablamos de Emilie du Châtelet, con quien compartió años felices de idilio bucólico-intelectual. Se conocieron en 1733 y descubrieron una pasión común (por Newton). Por aquel entonces, ella estudiaba álgebra, y durante algún tiempo los tres vivieron juntos (ella, Voltaire y el profesor de álgebra) en una especie de *ménage à* $x + y + z$ en un castillo que Emilie tenía en Champagne. Después z marchó de viaje, para volver a los dos años, en 1737, vía Basilea, donde recogió a un joven estudiante que resultó ser tan grosero que Emilie y Voltaire se apartaron de ellos. En aquel tiempo, Voltaire (como el resto de los franceses) encontraba a z arrogante en grado sumo. Lo que es razonable si se tiene en cuenta de dónde volvía.

¿Recuerda el lector que dije que una de las dos expediciones francesas, encabezada por La Condamine, fue al Perú para tratar asuntos geodésicos? Bien, z (también conocido como Pierre-Louis Moreau de Maupertuis) fue el tipo que se dirigió al norte para medir el otro meridiano, en Laponia.

Física del siglo XX

Lenguaje, contenido y filosofía

THE LANGUAGE OF PHYSICS. THE CALCULUS AND THE DEVELOPMENT OF THEORETICAL PHYSICS IN EUROPE, 1750-1914, por Elizabeth Garber. Birkhäuser; Boston-Basilea, 1999. **MORE THINGS IN HEAVEN AND EARTH. A CELEBRATION OF PHYSICS AT THE MILLENNIUM.** Dirigido por Benjamin Bederson. Springer-APS; Nueva York, 1999.

THE PHILOSOPHICAL WRITINGS OF NIELS BOHR. CAUSALITY AND COMPLEMENTARY. Edición preparada por Jan Faye y Henry J. Folse. Ox Bow Press; Woodbridge, 1998. **PHYSICS AND PHILOSOPHY: THE REVOLUTION IN MODERN SCIENCE,** por Werner Heisenberg, con introducción de F.S.C. Northrop. Prometeus Books; Amherst, 1999. **BOHM-BIEDERMAN CORRESPONDENCE. CREATIVITY AND SCIENCE.** Edición preparada por Paavo Pylkkänen. Routledge; Londres y Nueva York, 1999.

IDEALIZATION IX: IDEALIZATION IN CONTEMPORARY PHYSICS. Dirigido por Niall Shanks. Rodopi; Amsterdam, 1998. **EXPERIMENTAL ESSAYS-VERSUCHE ZUM EXPERIMENT.** Edición preparada por Michael Heidelberger y Friedrich Steinle. Nomos Verlagsgesellschaft; Baden-Baden, 1998. **ISSUES AND IMAGES IN THE PHILOSOPHY OF SCIENCE. SCIENTIFIC AND PHILOSOPHICAL ESSAYS FOR AZARYA POLIKAROV.** Dirigido por Dimitri Ginev y Robert S. Cohen. Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, 1997.

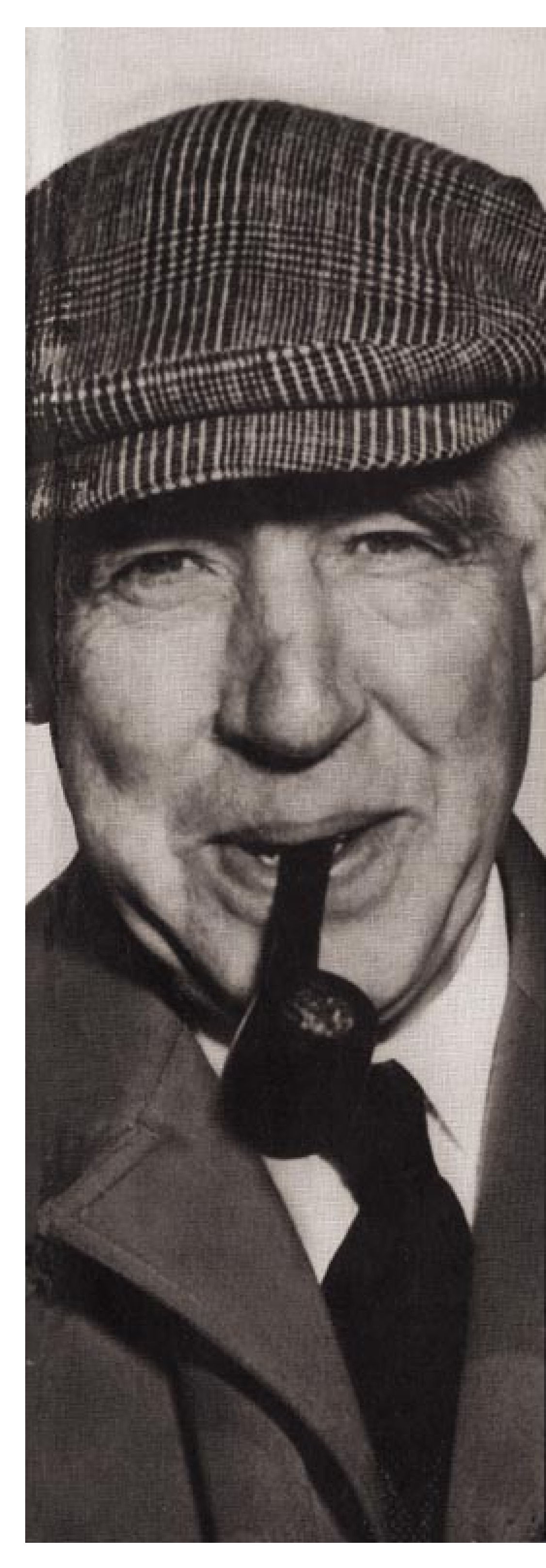
Pervive acrítica en la academia la opinión recibida de que el lenguaje, las ideas, los problemas y los métodos de la física nacieron simbióticos en los escarceos galileanos sobre la caída de los graves o, al menos, en los *Principia* de Newton. De ese error arraigado se propone liberarnos Elizabeth Garber en *The Language of Physics*, que empezó siendo una investigación histórica sobre mecánica y terminó por descubrir que, en el principio, fue la matemática.

En el siglo XVIII, físicos y matemáticos compartían un mismo interés por la mecánica. Para explorar la naturaleza, recurrían los primeros al experimento y la observación; en su descripción, cualitativa, empleaban el lenguaje común. En la inquisición de los mismos fenómenos, la mecánica era en los matemáticos mera excusa o punto de partida para ahondar en funciones, coeficientes, series o criterios de convergencia. Las agrias disputas sobre los fundamentos del cálculo, áncora de la física teórica desde la segunda mitad del XIX, brotaron de esa matriz.

Disputa sonada, la de Jean Le Rond d'Alembert y Leonhard Euler a propósito de la solución de la ecuación de ondas. D'Alembert no fue el primero en establecer, y luego solucionar, la ecuación del movimiento de una cuerda sometida a tensión. Se servía de las ecuaciones diferenciales parciales, ya conocidas. En el ejercicio de cálculo, así debemos clasificar su trabajo, buscaba demostrar la existencia de un infinito número de curvas que satisfacían el problema físico planteado. Euler, amén de criticar la hipótesis dalembartiana de unas vibraciones infinitamente pequeñas, se esforzó por establecer la ecuación del movimiento mediante el examen del equilibrio de fuerzas en un elemento de cuerda sometida a tensión. En ambos frentes, los argumentos descansaban en la resolución de una ecuación diferencial parcial.

Con Lagrange culminaba un siglo de curvas vibratorias. Sus escritos cementaron el enfoque matemático de la solución. Para Lagrange, el sonido y la cuerda vibratoria eran el medio para hacer avanzar el cálculo mediante la solución de la ecuación de onda. Lagrange deseaba convertir la mecánica en una rama del análisis.

Los experimentos de Charles Augustin Coulomb en electrostática, acometidos en el último tramo del XVIII, pasaron por el cedazo matemático que les fabricó Siméon-Denis Poisson. Este se hallaba estrechamente asociado con Laplace, quien a su vez se mostraba empeñado por ex-



Niels Bohr

pandir el reino de la geometría a la física. Propugnaba Laplace que cumplía a la teoría matemática explicar las desviaciones observadas en los planetas. La misma ley newtoniana de la gravedad debía suponerse no tanto una propiedad de la naturaleza cuanto una inferencia, vía matemática, de los resultados de la observación. En la misma onda, Ampère combinó sus resultados experimentales para desarrollar una teoría matemática de la electrodinámica.

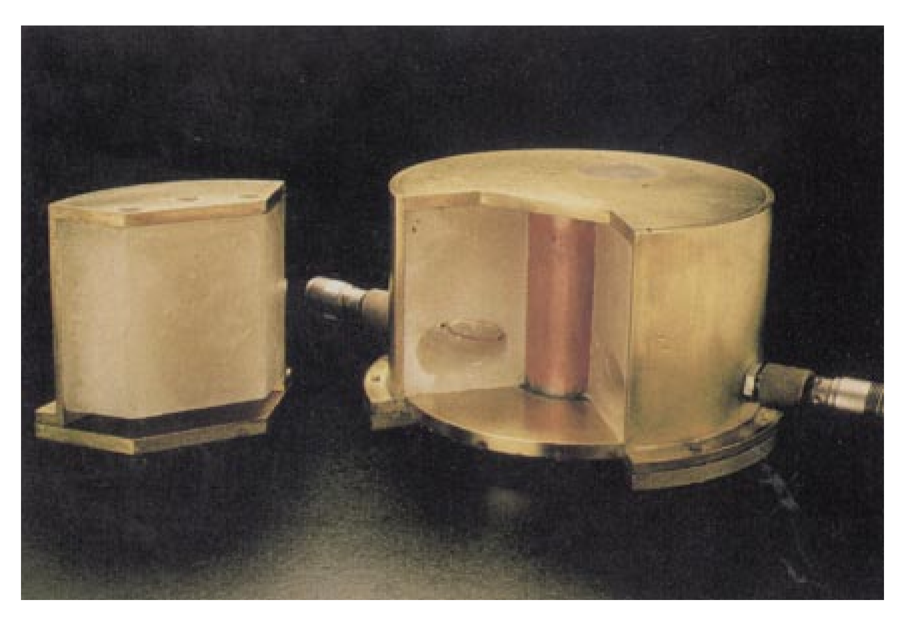
Figura clave en el cambio de agujas que se avecinaba fue Joseph Fourier, con su trabajo sobre propagación del calor. En los primeros decenios del siglo XIX se leyó su obra en clave matemática, para dar cabida luego a una interpretación física.

En ese modelo francés se espejó la primera generación de físicos formada en las universidades prusianas, decididos a romper con la Naturphilosophie. Así, Georg Ohm cuando desarrolló las leyes de la conducción eléctrica que tomaban en consideración todos los componentes del circuito.

William Wallace, Charles Hutton y Peter Barlow abrieron las islas Británicas al cálculo francés, en detrimento de las fluxiones. La carrera experimental que inicia Michael Faraday le permitirá extraer consecuencias precisas de sus logros en electricidad y magnetismo, aun confesando su pobreza matemática.

Mediado el siglo XIX, las explicaciones de la física se centran en las transformaciones conceptuales del campo. Nuevos términos y nociones entran en el discurso de la ciencia o experimentan un cambio semántico decisivo. Se evitan la metáfora y la analogía. Las universidades británicas renuevan el plan de estudios para dar cabida al calor y la luz. Edimburgo y Glasgow adaptaron la enseñanza de la matemática y la filosofía natural a las exigencias de los ingenieros. Impacto especial en Dublín tuvo la explicación de la matemática y la física francesas gracias a William Rowan Hamilton. Se proponía éste reducir la óptica al análisis, a la manera de Lagrange con la mecánica. Por su parte, William Hopkins preparaba en Cambridge a tres alumnos sobresalientes: James Clerk Maxwell, George Gabriel Stokes y William Thomson, fundadores de la física teórica.

Alumnos y maestros redactaban el *Cambridge Journal of Mathematics*, órgano difusor del análisis francés. En sus páginas Thomson defendía a Fourier. Advirtió que el movimiento del calor y la electrostática compartían expresiones matemáticas. Extendió al calor las analogías que otros habían visto entre electrostática y gravitación. Mediante sustitución de determinadas constantes en las ecuaciones básicas, observó que los problemas de calor, electrostática y gravitación se reducían a la solución de la misma ecuación matemática. Thomson iba de la física a la matemática y de ésta volvía a aquélla. A propósito del descenso de temperatura en un gas que sale de un orificio, comprobó que se trataba de un fenómeno “irreversible”; la irreversibilidad era algo tan físico como matemático. El enfoque de Thomson tomó cuerpo en el manual que escribió con Peter Guthrie Tait: podían reinterpretar la matemática de Euler, Green, Gauss, Lagrange y otros en términos de la física implícita en sus matemáticas.

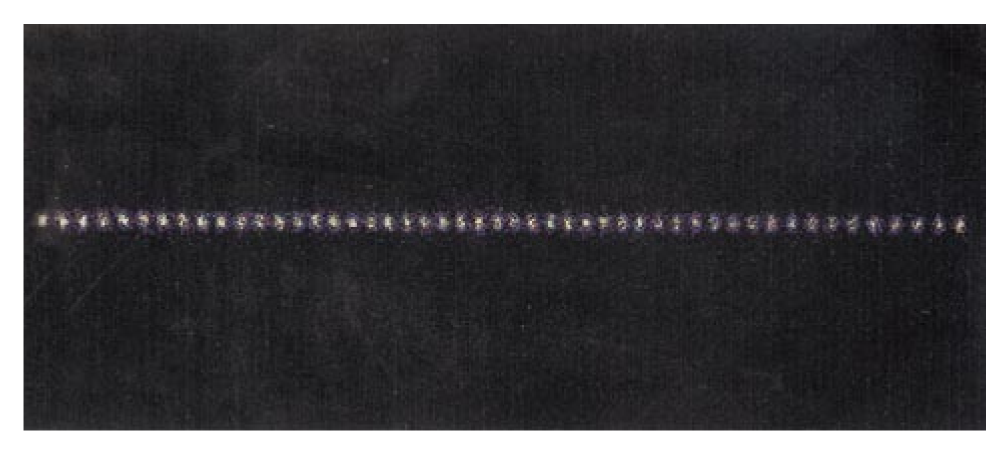


Cavidad resonante a 30 MHz rellena con parafina como muestra de protones. Se conserva en el Museo Smithsoniano. El corte permite observar su estructura interna

La obra de George Gabriel Stokes siguió un camino distinto de Thomson. En sus primeros trabajos sobre hidrodinámica refinó los teoremas de Cauchy y Poisson. Investigó sobre el éter. Y, centrado en las implicaciones físicas de la obra matemática de Fresnel, arriba a la conclusión de que las leyes de la reflexión y la refracción quedaban inalteradas por cualquier movimiento del éter. La física le llevaba a la matemática y la matemática a la física: las hipótesis físicas era el medio para establecer ecuaciones básicas. Maxwell se propuso remediar la debilidad matemática de las explicaciones de Faraday. En lo concerniente a las líneas de fuerza, que él aceptaba como dotadas de base natural, Maxwell se apoyó en la analogía física entre líneas de fuerza y líneas de corriente de un fluido incompresible. La comparación le permitía adoptar el aparato matemático de la hidrodinámica. Y al hacerlo, repitió las leyes conocidas de la electrostática, el magnetismo y la electricidad. Las descripciones físicas en lenguaje ordinario se ajustaron a las expresiones matemáticas de la hidrodinámica.

El entrañamiento de la matemática en la física, de Maxwell a hoy, es un dato incuestionado en *More Things in Heaven and Earth. A Celebration of Physics at the Millennium*, con el que la Sociedad Americana de Física celebra su centenario. Los 54 artículos de que consta despliegan un muestrario espectacular del éxito logrado a lo largo de los últimos cien años por la mente humana.

Hans Bethe recuerda los orígenes de la teoría cuántica, desde que Planck postuló en 1900 que la radiación electromagnética ni se absorbía ni se emitía de forma continua, sino que procedía en cuantos de energía $h\nu$, donde ν es la frecuencia y h es una constante (obviamente, la de Planck). Se esfuerza por trazar cierta continuidad de ideas entre la protomecánica cuántica, es decir, la esbozada por Bohr, y la maduración de la misma en el bienio 1925-1926 con la mecánica matricial de Heisenberg, la mecánica ondulatoria de Schrödinger y la generalización de Dirac.



Cadena lineal de iones en una trampa. La ubicación de los iones queda resaltada a través de la radiación de fluorescencia. Emiten persistentemente si se les ilumina con un haz láser, haz que sirve a su vez para enfriar los iones con el fin de que puedan guardar una configuración ordenada

Pais, más curtido en la reconstrucción histórica, se hace cargo de la física de partículas, con la radiactividad por motor. La física de altas energías es la física de las distancias pequeñas. Entre el descubrimiento de la radiactividad, en 1896, y el del núcleo atómico por Rutherford transcurren 15 años. Ello significaba que en ese intervalo temporal no podía formularse ni siquiera el enunciado cualitativo más simplista: la radiactividad es un fenómeno nuclear. La conexión entre energía de enlace nuclear y estabilidad nuclear no se estipuló hasta 1920. Pasarían, pues, 25 años antes de entender por qué sólo algunos elementos eran radiactivos.

En sus primeras etapas la física teórica no partía de resultados experimentales. En el segundo de sus escritos de 1905 sobre la relatividad Einstein establecía que "si un cuerpo desprende energía *L* en forma de radiación, su masa disminuye en L/c^2… La masa de un cuerpo es medida de su energía… No es imposible que con cuerpos cuyo contenido en energía es variable en alto grado (por ejemplo, con las sales de radio) la teoría pudiera someterse a prueba con éxito". La enorme importancia de la relación $E = mc^2$ no se reconoció hasta los años treinta. Con respecto a la teoría cuántica, en mayo de 1911 Rutherford anunciaba su descubrimiento del núcleo atómico y concluía que la desintegración α se debía a la inestabilidad nuclear, pero que la desintegración β se debía a la inestabilidad de la distribución del electrón periférico.

En 1905 Einstein propuso que, bajo determinadas circunstancias, la luz se comportaba como un chorro de partículas, o cuantos de luz. Esta idea encontró dura oposición hasta 1923, cuando el experimento de Arthur Compton sobre la dispersión de la luz por los electrones demostraba el comportamiento corpuscular de la luz.

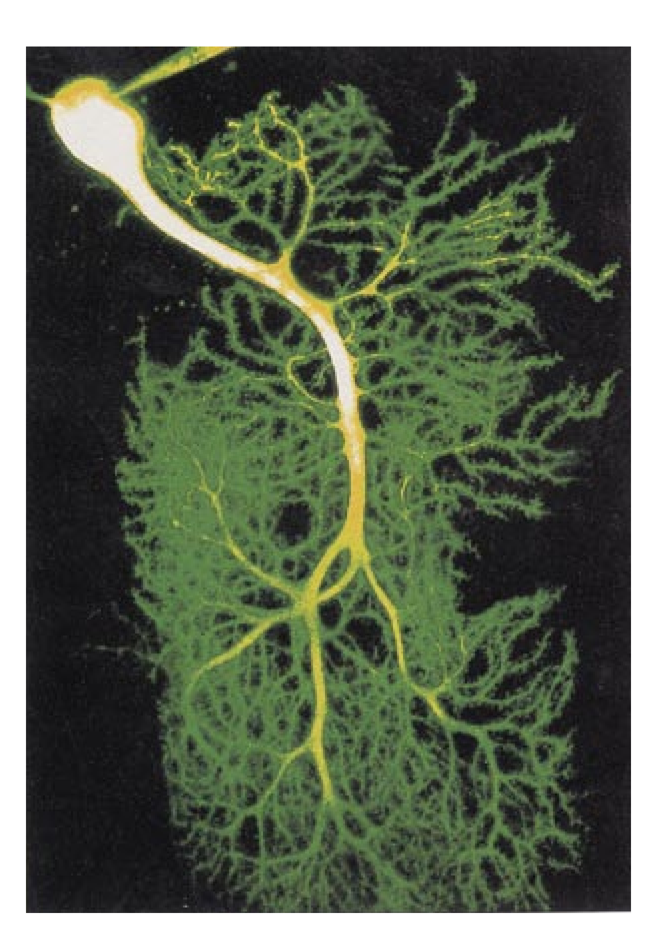


Imagen fluorescente de una célula de Purkinje de un corte cerebral humano. Las dimensiones de la célula son de unos 100 micrometros. Se ha empleado microscopía confocal

En los primeros decenios subsiguientes al descubrimiento de la radiactividad no se sabía que había fuerzas distintas que respondían de cada una de las tres clases de desintegración radiactiva: del proceso de desintegración α la interacción dominante era la fuerza fuerte; del proceso de desintegración β, la interacción débil; del proceso de desintegración γ, la fuerza electromagnética.

En 1927 Ellis y Wooster mostraron que el espectro beta continuo del Bi^{210} era de origen primario. Pauli dio la explicación correcta del efecto: la desintegración β es un proceso de tres cuerpos en el que la energía liberada es compartida por el electrón y una partícula neutra hipotética de masa muy pequeña, el neutrino. Fermi puso esa idea cualitativa en forma teórica. Su teoría de la desintegración β, la primera en que los campos de espín –1/2 cuántico aparecieron en física de partículas es la primera teoría cuantitativa de interacciones débiles. El acta de nacimiento de la física de la interacción fuerte la firman Chadwick y Etienne Bieler en 1921: "Los presentes experimentos no parecen arrojar ninguna luz sobre la naturaleza de la ley de variación de las fuerzas en la sede de una carga eléctrica, sino que se limitan a mostrar que las fuerzas son de una intensidad muy grande… Hemos de encontrar algún campo de fuerza que reproduzca esos efectos." Con el advenimiento de la teoría cuántica de campos, la física de partículas adquirió su propio lenguaje.

No fueron ajenos los protagonistas de la mecánica cuántica y de la relatividad a las implificaciones filosóficas que emergían. Determinismo y libertad, causalidad y sucesión, necesidad

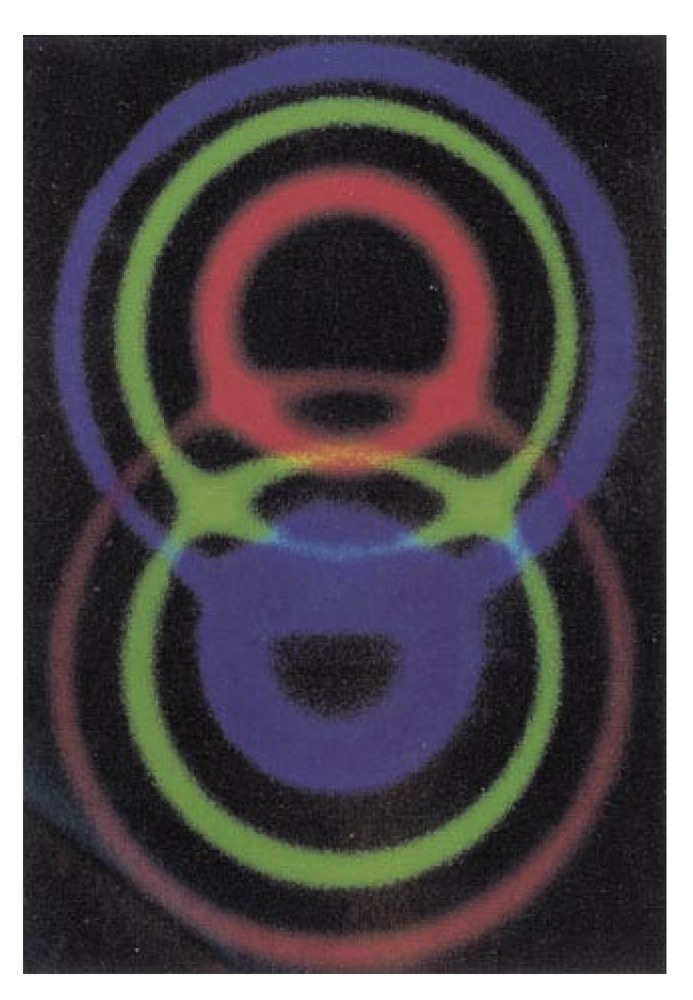
y contingencia, formas a priori, orden y caos revivían de su estado fósil. Tres ejemplos representan tres talantes que resumen las tendencias generales: el positivismo ingenuo de Bohr, la meta-física de Heisenberg y la ensoñación holística de Bohm.

The Philosophical Writings of Niels Bohr agavillan una veintena de ensayos concernientes a su epistemología de la complementariedad. Por su obscuridad y falta de precisión, los escritos filosóficos de Bohr han dado pie a exegesis contradictorias. Una es la complementariedad cinemática-dinámica de los primeros escritos y otra la complementariedad entre onda y partícula archivada en los diccionarios. Las vincula él en su ejemplo favorito, el experimento de la doble rejilla.

Con motivo del Segundo Congreso Internacional por la Unidad de la Ciencia, que se celebró en Copenhague en junio de 1936, dictó el ensayo "Causalidad y complementariedad", donde se aleja de su idea de las relaciones de incertidumbre entendidas como limitación epistemológica para designar la interacción incontrolable del objeto de investigación. En coherencia con ello exige que la definición de fenómeno abarque la descripción completa del dispositivo experimental.

Bohr mantuvo contacto asiduo con los positivistas Otto Neurath, Jorgen Jorgensen y Philipp Frank. Según Neurath, se explicaba con cierta soltura anti-metafísica, insuficiente para adscribirlo a la causa. Les unía también su rechazo a conceder significado a otra cosa que no fueron los fenómenos. Pero de ahí a un reduccionismo fisicalista mediaba un abismo que Bohr no saltó.

En pocas ocasiones tendrá el lector la oportunidad de una visión fresca y directa de los presocráticos como la ofrecida por Werner Heisenberg en *Physics and Philosophy*. Escrita con idéntica hondura y claridad con que expuso los fundamentos y el aparato matemático de la mecánica cuántica en *The Physical Principles of the Quantum Theory*. Para la historia de las relaciones ciencia-filosofía resulta casi inevitable recordar su principio de incertidumbre (o de indeterminación), más famoso que bien interpretado, que afirma que el comportamiento de las partículas subatómicas puede predecirse sólo sobre la base de la probabilidad.



Representación de la radiación producida en una conversión paramétrica. El efecto se produce con tres fotografías tomadas con filtros de distinto color y superpuestas

Las cuestiones filosóficas acuciaron la mecánica cuántica desde su origen. En el terreno metodológico, las contradicciones aparentes, que violaban el principio lógico del "tertium non datur", o el valor probativo de los experimentos mentales. En 1924 Bohr, Kramers y Slater se propusieron resolver las contradicciones aparentes entre la descripción ondulatoria y la descripción corpuscular mediante la noción de onda de probabilidad, cuya intensidad determina en cada punto la probabilidad de la absorción (o emisión inducida) de un cuanto de luz por un átomo. De esa idea se infería que las leyes de conservación de la energía y el momento no eran ciertas para un acontecimiento determinado, sino que eran sólo leyes estadísticas, verdaderas sólo en un promedio estadístico. La inferencia, aunque incorrecta, llamó la atención sobre un carácter esencial de la teoría cuántica: la idea de onda de probabilidad, una tendencia hacia algo, una versión cuantitativa del viejo concepto aristotélico de "potentia". Entre la idea del acontecimiento y su realidad se introducía una tercera entidad, a medio camino entre posibilidad y realidad.

Pero no hemos de precipitarnos en forzar el horizonte filosófico de las teorías físicas. "La interpretación moderna de los sucesos atómicos guarda escaso parecido con la filosofía materialista; cabría incluso afirmar que la física atómica ha rescatado a la ciencia de la tendencia materialista en que quedó atrapada en el siglo XIX." El la ve más próxima a la doctrina de Heráclito. Si sustituimos la palabra "fuego" (para Heráclito el elemento fundamental que es a la vez materia y fuerza motriz) por la palabra "energía" podemos superponer ambas interpretaciones. La energía es la sustancia a partir de la cual se constituyen partículas elementales, átomos y todas las cosas. La energía es una sustancia, puesto que su cantidad total no cambia, y las partículas elementales pueden construirse a partir de esa sustancia. La energía puede trocarse en movimiento, en calor, en luz y en tensión. La energía es la causa fundamental del cambio en el mundo.

Recuerda vagamente la filosofía de David Bohm (1917-1992) uno de nuestros vicios patrios, el ensayismo. La resistencia a embridar la imaginación, sustituyendo una imagen feliz o brillante por un enunciado preciso. Charles Biederman fundó en los años treinta el Constructivismo, movimiento artístico que emplea elementos geométricos integrados en estructuras dinámicas. Bohm fue un físico con interés en el arte; Biederman, un artista con inquietudes científicas. *Bohm-Biederman Correspondence*

ofrece un cuadro excepcional de la mutua convergencia.

En la interpretación bohriana no cabía una descripción determinista del movimiento de los sistemas cuánticos; el electrón puede mostrar comportamiento y propiedades corpusculares y ondulatorias, en razón de la situación experimental. Bohm, tras un período ortodoxo durante el cual escribió *The Quantum Theory,* se sintió incómodo con lo que consideraba cabos sueltos de la interpretación de Copenhague. Y terminó por argumentar que los sistemas cuánticos individuales (los electrones) están determinados por un nuevo tipo de campo, tienen una existencia bien definida como partículas y se mueven de una manera determinista a lo largo de sus trayectorias.

El 6 de marzo de 1960 Biederman escribe a Bohm. No le conoce, pero acaba de cerrar *Causality and Chance in Modern Physics*, que le había recomendado otro artista, Anthony Hill. Para Biederman el libro supuso una revelación. Lo que ninguno de los dos sabía entonces es que a aquella breve misiva de reconocimiento y presentación iban a seguir unas 4000 páginas de correspondencia, escritas entre marzo de 1960 y abril de 1969. En este primer volumen se publican las cartas que cubren del 6 de marzo al 24 de abril de 1962. Más allá de lo aceptado en cualquier sociología de la ciencia, por laxa que sea, Bohm declara que las corrientes de pensamiento, emoción y reacción general ante las condiciones sociales y mundiales, que condujeron en filosofía al Positivismo y al Existencialismo, en pintura al Surrealismo y el Expresionismo, han contribuido de una forma intensa a las ideas que subyacen bajo la interpretación de Bohr de la teoría cuántica.

¿Cómo entienden los profesionales de la filosofía el método, los procesos experimentales y la naturaleza de la física? Acerca del método se reflexiona en *Idealization.* El término evoca masas puntuales, varillas rígidas, planos exentos de rozamiento y otros constructos de parecido jaez. Mas, ¿en qué consiste exactamente la idealización? ¿Cuál es la diferencia entre una idealización matemática y una idealización física?

En bastantes ocasiones, la idealización lleva aparejado un experimento mental, artificio psicológico denostado por Feyerabend y diacrítico de la racionalidad de una teoría para los más. La idealización se asocia también a modelo; un modelo constitutivo de una teoría sería una explicación ideal. Aplicada a las leyes de la física el debate gira en torno a la distinción, muy criticada en su radicalidad, que Nancy Cartwright establece entre idealización de situaciones concretas para producir leyes fenomenológicas, empíricas, que son aproximadamente verdaderas, de los objetos reales, concretos, e idealización que implica abstracción a partir de situaciones concretas y que conduce a entidades ficticias, como los espacios de Hilbert.

En física clásica, una buena idealización es la que produce una buena aproximación a los fenómenos; cuando una magnitud es pequeña o cercana a cero, se prescinde de sus efectos (son "despreciables"). Pero el tándem se resquebraja en el dominio de lo cuántico. La cuantización impide la consideración de efectos arbitrariamente pequeños. El hecho de que las trazas de un paquete de ondas sean pequeñas en una región no comporta que el efecto de la partícula en esa región sea despreciable.

Experimental Essays-Versuche zum Experiment nos trae a primer plano los pros y contras del llamado Nuevo Experimentalismo (en oposición al "viejo" de Mach, de principios de siglo). Hasta hace una veintena escasa de años, la filosofía de la ciencia minusvaloraba el papel del experimento. Lo mismo empiristas lógicos que críticos popperianos o kuhnianos concedían a la experimentación y a la observación la misión subsidiaria de respaldar la teoría.

Aunque no es lo mismo experimentación que observación. Con aquella se dan una intervención en los procesos y una manipulación de los objetos sometidos a examen. Los experimentos crean estados. La observación, se realice a ojo desnudo o con un radiotelescopio, nunca implica intervención. Por otro lado, la experimentación implica bastante más que someter a prueba las teorías.

¿Cuánto más? Los resultados experimentales, afirman, pueden obtenerse con notable precisión e interpretarse con independencia de una teoría de nivel superior, independencia que garantizaría su estabilidad en las revoluciones o cambios conceptuales. Independencia a la que otros ponen sordina. Toda interpretación de un resultado está sujeta a las teorías involucradas en el dispositivo experimental y en la operación de los instrumentos de medida; sin olvidar una matización añadida: en mecánica cuántica la medición no determina una propiedad del objeto, sino que la define.

Issues and Images in the Philosophy of Science está dedicado a Azarya Polikarov, historiador y filósofo de la física. Nacido en Sofía en 1921 y formado en el marxismo oficial rechazó, sin embargo, la filosofía dialéctica "metacientífica" en todas sus variantes. Se opuso al positivismo lógico y criticó la idea de Carnap de una ciencia unificada mediante la construcción de un lenguaje universal, así como su abominación de la metafísica.

Para Polikarov, el estudio filosófico de la ciencia ha de ser, a su vez, ciencia, sin que ello obligue a abrazar una epistemología naturalista. En su opinión, la teoría del conocimiento no debe ser ni normativa ni representativa. Propone lo que denomina estudio heurístico de los modos de ser cognitivo en el mundo; un marco harto nebuloso en el que el conocimiento no es espejo de una realidad independiente, sino un proceso de búsqueda de campos de posibles soluciones de los problemas que surgen en nuestra adaptación cognitiva.

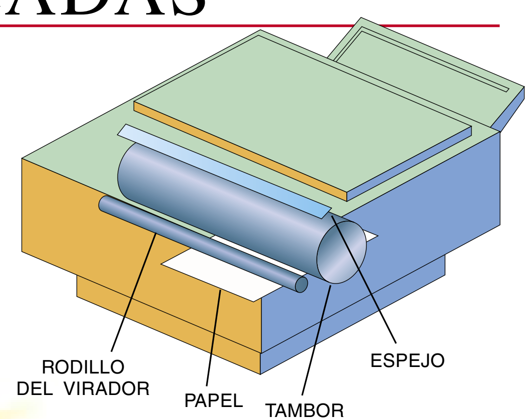
Tras ese lenguaje esotérico se esconde la vieja disputa entre realismo y antirrealismo, planteada de nuevo en la filosofía de la física contemporánea. Parece claro, al menos para los físicos, que la ciencia se propone describir una "realidad" que posee existencia propia e independiente; en última instancia, la ciencia persigue ofrecer una imagen adecuada de la realidad. Estas afirmaciones que se dirían incontrovertibles vienen siendo cuestionadas por epistemólogos fundados en la filosofía del lenguaje. La verdad no estaría en la conmensuración de la imagen con la realidad, sino en la semántica global, es decir: el significado de los términos dependería totalmente del contexto entero en cuyo seno se inscriben dichos términos. Queda así excluida cualquier posibilidad de comparación entre teorías alternativas. Para no dejar resquicio, no habría distinción entre términos observacionales y términos teóricos, pues aquéllos portarían una carga teórica determinante. Con semejante solipsismo, la filosofía antirrealista, en su nueva indumentaria, no hace más que desnaturalizar la ciencia, ya que en vez de explorar el mundo, debería explorar el lenguaje.

LUIS ALONSO

IDEAS APLICADAS

Louis A. Bloomfield

Impresoras láser



En una impresora láser se combinan la técnica de impresión de una copiadora xerográfica [*véase* “Ideas aplicadas”, diciembre de 1996] con una pequeña demostración de luz láser. El componente principal de estas impresoras es un tambor revestido de una sustancia fotoconductora que en un principio está dotada de carga negativa y que no puede conducir electricidad a menos que quede expuesta a la luz.

1 CUANDO DEL ORDENADOR LLEGA UNA ORDEN DE IMPRIMIR, los circuitos microelectrónicos de la impresora dirigen un haz láser de intensidad variable sobre un espejo y éste refleja la luz infrarroja hacia zonas de la superficie del tambor o cilindro. Las áreas iluminadas empiezan a conducir electricidad, a consecuencia de lo cual de esas zonas escapan cargas. En el momento en que el láser deja de actuar, el tambor se halla cubierto de un patrón de áreas cargadas negativamente (las no alcanzadas por la luz) y zonas exentas de cargas (áreas que recibieron luz).

2 PARA REVELAR LA IMAGEN DE CARGAS, la impresora acerca al tambor el virador (“toner”), compuesto éste por partículas negras cargadas negativamente. Como las cargas del mismo signo se repelen, el virador no se adherirá a las partes del tambor que no estuvieron expuestas a la luz. Pero sí se trabará débilmente a las áreas no cargadas del cilindro. Así la imagen de cargas se habrá convertido en una imagen de tinta.

3 CON EL VIRADOR YA EN SU LUGAR, la impresora comunica una carga positiva a una hoja de papel en blanco y hace que sobre ella ruede el tambor. Entonces, el papel, portador de carga positiva, atrae a las partículas de virador, dotadas de carga negativa, y las separa del tambor. A medida que el papel sale de la impresora, un rodillo calefactor derrite el virador, que es plástico, y lo funde permanentemente con el papel.

Indice anual

Este índice contiene los títulos de los artículos y los nombres de los autores aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 1999.*

MATERIAS

AUTORES

Conozca las perspectivas del nuevo milenio en nuestro número especial de enero



¿QUE MISTERIOS RESOLVERA, QUE AVANCES REGISTRARA LA CIENCIA DE AQUI A MEDIO SIGLO?, por John Maddox

Es muy probable que ni siquiera podamos imaginar los descubrimientos más importantes de los próximos 50 años.

¿POR FIN LA UNIFICACION DE LA FISICA EN EL AÑO 2050?, por Steven Weinberg

Los experimentos del CERN y otros laboratorios deberían permitirnos cerrar el modelo estándar de la física de partículas, pero una teoría unificada de todas las fuerzas requerirá ideas nunca avanzadas.

LA EXPLORACION DE ESTE UNIVERSO Y DE OTROS, por Martin Rees

Los cosmólogos despejarán en el siglo XXI el misterio del nacimiento de este universo. Hasta demuestren quizá la existencia de otros mundos.

EL CODIGO DE LA VIDA, DESCIFRADO, por Francis S. Collins y Karin G. Jegalian

El estudio de todos los genes que componen la plantilla de los diversos organismos encontrará solución a la principales cuestiones sobre la vida.

FIN DE LA DICTOMIA NATURALEZA-EDUCACION, por Frans B. M. de Waal

¿Está determinado el comportamiento humano por la genética o por el ambiente? Cabe suponer que, para el 2050, tengamos resuelta la contraposición.

EL IMPACTO HUMANO SOBRE EL CLIMA, por Thomas R. Karl y Kevin E. Trenberth

¿Cuál es nuestra parte en las transformaciones del clima? La anhelada respuesta puede llegar hacia el año 2050, pero sólo si todas las naciones del mundo se comprometen desde ahora a la vigilancia del clima a largo plazo.

¿PUEDE DEMORARSE EL ENVEJECIMIENTO HUMANO?, por Michael R. Rose

En teoría, sí. Pero no habrá elixir mágico. Los tratamientos contra el envejecimiento del futuro tendrán que contrarrestar muchos procesos bioquímicos que llevan a la destrucción.

DEL CEREBRO A LA MENTE, por Antonio R. Damasio

Filósofos, neurólogos y gente común se preguntan por la naturaleza de la conciencia. Un conocimiento más profundo del mecanismo de operación del cerebro tendría que llevarnos a la solución.

¿EXISTE VIDA EN OTRAS PARTES DEL UNIVERSO?, por Jill C. Tarter y Christopher F. Chyba

Nadie lo sabe. La búsqueda de vida extraterrestre no ha sido tan exhaustiva como pudiera creerse. Tal situación está a punto de cambiar.

EL APOGEO DE LOS ROBOTS, por Hans Moravec

Hacia el 2050 los "cerebros" basados en computadores que ejecuten 100 billones de instrucciones por segundo empezarán a rivalizar con la inteligencia humana.